

EXTENDED ABSTRACT

Evaluation of Interaction between Aquifer and river Using Integrated SWAT-MODFLOW-NWT Model (Case study: Mahabad plain)

O. Raja¹, M. Parsinejad^{2*} and M. Tajrishi³

1- Ph.D. candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2- Corresponding Author, Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, (parsinejad@ut.ac.ir)

3- Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 1 March 2022

Revised: 3 July 2022

Accepted: 6 July 2022

TO CITE THIS ARTICLE:

Raja, O., Parsinejad, M., Tajrishi, M. (2023). 'Evaluation of Interaction between Aquifer and river Using Integrated SWAT-MODFLOW-NWT Model (Case study: Mahabad plain)', Irrigation Sciences and Engineering, 45(4), pp. 49-72. doi: 10.22055/jise.2022.40163.2018.

Keywords:

Recharge, Water table, Interactions, Evaporation, Sustainability, Lake Urmia.

Introduction

Surface and groundwater dynamically interact at different spatial or temporal scales within a plain. Accurate estimation of water balance components is an important simulation of such interactions. Despite the rapid expansion of numerical models over the past two decades, there is still room for improvement for comprehensive and integrated assessment as well as management of surface and groundwater resources. In particular, the use of coupled surface and groundwater models is important to connect both surface and groundwater, and for proper representation of the water balance in the unsaturated root zone. The results of various studies suggest that the combination of SWAT and MODFLOW models can satisfactorily simulate the interaction between surface and groundwater at different spatial and temporal dimensions (Sophocleous and Perkins, 2000; Sun and Cornish, 2005; Bejranonda et al., 2007). Indeed, if both models are used simultaneously, not only the limitations of the two individual models can be improved, but also the temporal-spatial properties of the target area can be adequately reflected (Kim et al., 2008; Park and Bailey, 2017; Wei et al., 2018). Specifically in the Urmia Lake Basin, which has been severely affected by indiscriminate exploitation of water resources, these models can be used to maximize the supply of Urmia Lake based on the pattern of supplying irrigation needs from integrated water sources. This requires the interaction of surface and groundwater resources in different locations of plains and aquifers to be simulated and predicted based on different shares of agricultural water supply from integrated water sources.

The main purpose of this study was to evaluate the interaction between ground and surface water in Mahabad plain using the coupled SWAT-MODFLOW-NWT model as a comprehensive and integrated model. The main challenge in this study is the interaction and monitoring of water table adjacent to the surface water bodies.

Methodology

In this study, DEM SRTM map in 30 m scale was used to prepare groundwater maps and geometry of Mahabad aquifer such as aquifer boundary, groundwater level, bed rock, etc. Monthly groundwater levels measured data from 22 piezometer wells were used in the modeling during the simulation period. The recharge values obtained from the SWAT model were introduced to the MODFLOW-NWT model for simulating the water table level and groundwater balance components.

The active region of the MODFLOW-NWT model covers an area of about 253 Km². Discretization of MODFLOW-NWT model of Mahabad plain was done by creating a regular mesh of finite differences of 3348 cells with cell size of 500 m by 500 m with 1013 active cells. WEL package in MODFLOW-NWT model was used to simulate groundwater pumping. ETS and RCH packages were used to simulate evaporation from groundwater and groundwater recharge in the MODFLOW-NWT model, respectively. The RIV package was employed to investigate the interaction between surface and groundwater resources. In the MODFLOW-NWT model, the in- and outflow boundaries using variable hydraulic load (General Hydraulic Boundary) were considered along with the boundaries without flow using specific hydraulic load (Specific Head Boundary). To simulate the steady state, the measured water table of piezometer wells in October 2009 was used. Finally, the coupled model was run for transient state for a period of ten hydrological years (from the hydrological year of 2009-2010 to 2018-19).

Since the depth of the water table is monitored on a monthly basis, the modeling time step was also considered as monthly. Calibration and validation of groundwater model were also done via trial and error and using automatic PEST methods for six hydrological years from 2009-2010 to 2014-2015, plus four hydrological years from 2015-2016 to 2018-2019, respectively. Hydraulic conductivity (K), transmissivity (T), and specific yield (S_y) are the most important hydrodynamic coefficients controlling groundwater flow. After the initial run of the model, the hydraulic conductivity (K) values were calibrated. In the next step, the model was calibrated based on specific yield (S_y) using time-varying data including operation wells, recharge, and observation wells for the transient state. The interactions between ground and surface water for dry (2016-17), normal (2017-2018), and wet (2018-2019) years were evaluated. Also, areas with potential for groundwater evaporation were identified.

Results and Discussion

In the previous study (Raja et al., 2022), the results showed that the coupled model could well simulate water table. The results of the model evaluation were satisfactory in calibration of the model for simulating groundwater level and groundwater balance components.

Examination of groundwater level in the simulation time step (monthly) revealed that the error rate has increased in some months such as October, April, May, June, and September. The reason for this observation can be attributed to the sudden increase of water table in some observed locations along the Mahabad river from the upstream floods, and subsequent local release of a large volume of water in the river, leading to fluctuations in groundwater due to water leakage from the river to the aquifer. Also, increased groundwater extraction has resulted in drop in groundwater level at some observed locations. Thus, releasing a significant volume of water in a short period of time in the river or increasing the extraction in a specific area would result in sudden changes in groundwater level in some modeling areas. This elevation of the groundwater level causes increased error in simulation of piezometers records. Moreover, it is not possible to accurately estimate and monitor in and outflow groundwater in boundaries. As such, the errors in piezometers near the inlet and outlet boundaries of the aquifer have also increased.

Specifically, in this study, the interaction between surface and groundwater sources showed that the interaction between the aquifer and the river was significant and varied in different hydrological years. Streams connected to the main river of Mahabad, which mainly flow seasonally, contribute to the effect of these flows on groundwater fluctuations in different locations of the plain. The interaction between surface and groundwater sources mainly results in drainage from the aquifer by the river in dry, normal, and wet years at the rate of about 30.25, 37.50, and 40.15 million cubic meters per year in the central and northern areas of plain (Fig.1). These areas have an almost flat topography with a shallow depth of groundwater level of 1 to 5 meters. This makes the rivers to act as drainage and lead to the discharge of groundwater;

however, in the southern and Eastern parts of the plain, where the groundwater level is lower than other areas, groundwater is recharged by the river. The values of recharge by the river in these areas in dry, normal, and wet years were estimated at about 5.35, 7.95, and 9.60 million cubic meters per year, respectively (Fig. 1).

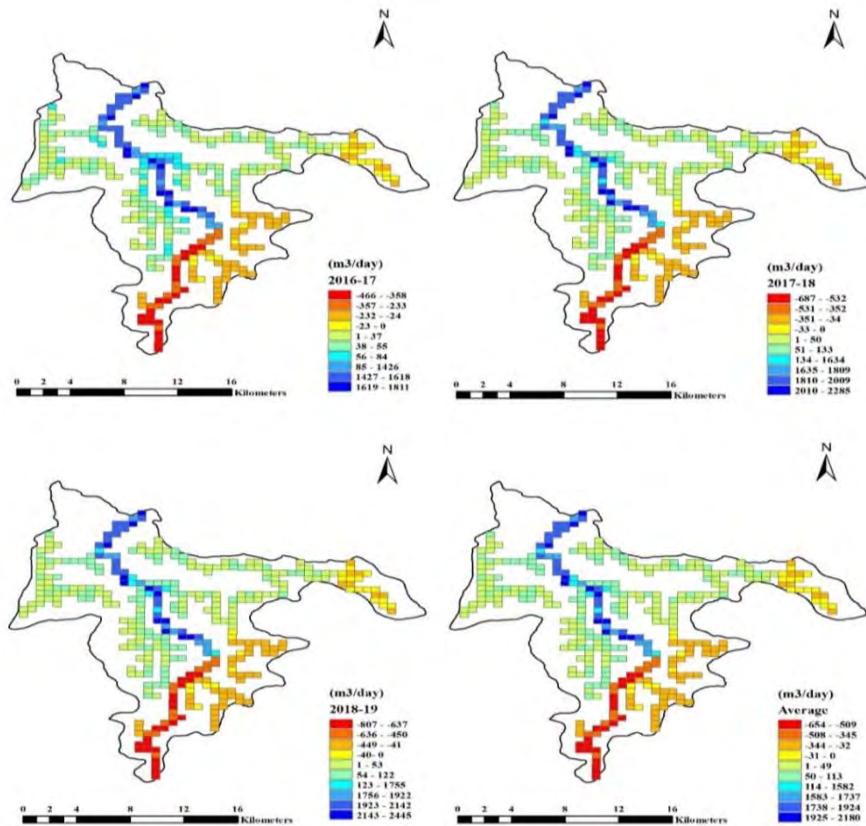


Fig. 1- Recharge and drainage rate between river and aquifer for three water years 2016-17 (dry year), 2017-18 (normal year) and 2018-19 (wet year)

On average, during the three hydrological years, the daily rate of evaporation from groundwater varies from 0.01 to 0.51 mm/day. Examination of the distribution pattern of evaporation from groundwater indicates that the evaporation from groundwater occurred mainly in the central and northern areas of the plain and along the main Mahabad river. The evaporation rate from groundwater level diminishes in the Eastern and southern parts of the plain. This pattern is largely consistent with the level and depth of groundwater. Also, the results revealed that the area and rate of evaporation from the groundwater level in wet year have been greater than in normal year and, in normal year have been higher than in dry year.

Conclusions

In recent decades, the water supply from groundwater resources has led to the development and simultaneous use of both surface and groundwater resources. It is therefore important to study interactions between surface and groundwater resources on temporal and spatial scales. The results of this study revealed that the coupled SWAT-MODFLOW-NWT model could properly simulate the interaction between surface and groundwater resources in different areas based on the different share of agricultural water supply from both water sources. The results of this study can be used as a guide in the optimal and sustainable use of surface and groundwater resources. So, the results demonstrate the extraction capacity of the aquifer in the central and northern regions of the aquifer for irrigation. Indeed, it would also reduce the share of evaporation loss. By maintaining proper groundwater level (in sustainable conditions), soil

quality is also improved and as a result, the machinery operation is improved; however, there is a limit to further extraction of groundwater around rivers. This is because in this area, there is possibility of development of a reverse hydraulic gradient between surface and groundwater, and as a result, negative effect of leakage from the river can take place. Indeed, adopting a proper pattern of both water resource supplement in different years can ensure the stability of groundwater and improved release of surface water flow to the lake.

Acknowledgments

This article has been prepared from the results of the first author's Ph.D. Thesis with the supervisor and advisor of the second and third author's research with the support of Urmia Lake Restoration (ULRP). The authors express their gratitude to the Urmia Lake Restoration headquarters who provided access to the data required for the preparation of this manuscript.

References

- 1- Bejranonda, W., Koontanakulvong, S. and Koch, M. 2007. Surface and groundwater dynamic interactions in the Upper Great Chao Phraya plain of Thailand: semi-coupling of SWAT and MODFLOW; groundwater and ecosystems, IAH selected papers on hydrogeology; *International Association of Hydrology*: Goring, UK, pp. 17-21.
- 2- Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S. and Arnold, J. G. 2008. Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. *Journal of Hydrology*, 356(1-2), pp. 1-16.
- 3- Park, S. and Bailey, R.T., 2017. SWAT-MODFLOW tutorial: documentation for preparing model simulations; department of civil and environmental engineering, Colorado State University: Fort Collins, CO, USA; 56p.
- 4- Raja, O., Parsinejad, M., and Tajrishi, M., 2022. Simulation of Groundwater Balance Using Integrated Surface and Groundwater SWAT-MODFLOW-NWT Model (Case Study: Mahabad Plain), *Journal of Water and Soil*, 36 (1), pp. 32-52. (In Persian).
- 5- Sophocleous, M. and Perkins, S.P., 2000. Methodology and application of combined watershed and ground water models in Kansas. *Journal of Hydrology*, 236(3-4), pp. 185-201.
- 6- Sun, H., and Cornish, P.S. 2005. Estimating shallow groundwater recharge in the headwaters of the Liverpool plains using SWAT. *Hydrological Processes*, 19(3), pp. 795-807.
- 7- Wei, X., Bailey, R.T., Records, R.M., Wible, T.C. and Arabi M. 2018. Comprehensive simulation of nitrate transport in coupled surface-subsurface hydrologic systems using the linked SWAT-MODFLOW-RT3D model, *Environmental Modelling and Software*, 122, pp. 1-10.



© 2023 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ارزیابی اندرکنش آبخوان و رودخانه با استفاده از مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW-NWT (مطالعه موردی: دشت مهاباد)

امید رجا^۱، مسعود پارسی نژاد^{۲*} و مسعود تجربی شی^۳

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، parsinejad@ut.ac.ir
۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۵

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۰

چکیده

هدف اصلی از انجام این مطالعه بررسی مکان‌یابی مناطق نشت و زهکشی بین آبخوان و رودخانه در دشت مهاباد واقع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW-NWT است. مدل برای دوره ده ساله اجرا شد. بررسی‌های اندرکنش بین منابع آب سطحی و زیرزمینی نشان داد در نواحی مرکزی و شمالی دشت عمده‌تاً منجر به زهکشی آب از آبخوان به رودخانه به میزان ۳۰/۲۵ تا ۴۰/۱۵ میلیون مترمکعب به ترتیب در سال‌های خشک و تر نسبت به تغذیه آب زیرزمینی توسط رودخانه‌ها می‌شود؛ اما به دلیل شرایط هیدرولیکی متفاوت در نواحی جنوبی و غربی، نشت از رودخانه‌ها منجر به تغذیه آبخوان به میزان ۳۵/۵ تا ۷۰/۹ میلیون متر مکعب در سال می‌گردد. نتایج نشان داد به طور متوسط در طول سه سال آبی موردنظر میزان تبخیر روزانه از آب زیرزمینی بین ۵۱/۰ تا ۵۱/۰ میلی‌متر در روز متغیر بود. بررسی‌ها نشان می‌دهد گستره تبخیر از آب زیرزمینی عمده‌تاً در نواحی مرکزی و شمالی دشت و در امتداد رودخانه اصلی مهاباد چای متوجه شده و در نواحی شرقی و جنوبی دشت کاهش می‌یابد. این الگو تا حدود زیادی با وضعیت تراز و عمق سطح آب زیرزمینی نیز مطابقت دارد. به طور کلی بررسی‌های نشان می‌دهد مدل به خوبی توانست الگوی زمانی و مکانی اندرکنش بین آبخوان و رودخانه و نیز تبخیر از سطح آب زیرزمینی در منطقه را شبیه‌سازی کند.

کلید واژه‌ها: تغذیه، تراز آب زیرزمینی، فعل و انفعالات، تبخیر، پایداری، دریاچه ارومیه.

و تقاضای منابع آب استفاده شود (Kardan Moghaddam et al., 2018). مدل MODFLOW، مدلی فیزیک محور و کاملاً توزیعی است که جریان‌های آب زیرزمینی در محیط متخالخ را به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی می‌کند (McDonald and McDonald, 1988; Harbaugh, 2003). این مدل به عنوان یک مدل استاندارد در حالت‌های پایدار و ناپایدار پذیرفته شده است (Palma and Bentley, 2007; Bedekar et al., 2012). بررسی‌ها نشان داده است مقادیر تغذیه ناشی از بارندگی و جریان‌های برگشتی آب آبیاری یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های ورودی به مدل‌های آب‌های زیرزمینی در مناطق Sophocleous, 2005; Sun and Nimehcheshk and خشک است (Cornish, 2005; Scanlon et al., 2006). به طوری که عدم قطعیت در تعیین این پارامتر، به میزان قابل توجهی در نتایج شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و در ارزیابی رفتار طولانی مدت یک آبخوان تحت تأثیرات سناریوهای مختلف مدیریتی برداشت از آب‌های زیرزمینی تأثیر بهسازی خواهد داشت (Wheater, 2010). در عین حال، مدل SWAT به عنوان یک مدل جامع

مقدمه

تأمین آب موردنیاز در بخش کشاورزی در بسیاری از مواقع به صورت تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی تأمین می‌شود. با توجه به جانمایی رودخانه‌ها و موقعیت چاه‌های بهره‌برداری، تبدلات تغذیه و برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی به صورت توأمان و با برهم‌کشی پویا صورت می‌گیرد (Saberimehr et al., 2017). برآورد دقیق مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی و سطحی و پتانسیل منابع آب زیرزمینی برای دستیابی به بهره‌برداری پایدار از منابع آب در مناطق دارای آبخوان و رودخانه با توجه به پیچیدگی ارتباط بین آبخوان و رودخانه‌ها حائز اهمیت است (Wei and Baiely, 2019). در عین حال تبیین تغییرات زمانی و مکانی ارتباط و اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی حائز اهمیت است (Mojtahedi et al., 2018; Nassery, 2019).

مدلی که بتواند کلیه فعل و انفعالات در سامانه‌های سطحی و زیرسطحی و اثربخشی الگوهای بهره‌برداری تلفیقی را بر مؤلفه‌های بیلان آب (از جمله جریانات سطحی) را مد نظر قرار دهد می‌تواند به عنوان یک ابزار کارآمد برای مدیریت و حل تناقضات بین عرضه

بیش از عوامل اقلیمی است. ارتباط هیدرولیکی آبخوان دشت لور اندیمشک و رودخانه دز با استفاده از مدل MODFLOW ارزیابی و سپس این ارتباط در سناریوهای مختلف مدیریتی شامل کمترین دبی در رودخانه و پیش‌بینی تبادلهای آبخوان و رودخانه در دوره‌های خشکسالی و ترسالی بررسی شد (Nozarpour et al., 2015). به طور کلی نتایج نشان داد رودخانه دز در بیشتر مسیر خود تغذیه کننده آبخوان است. همچنین، نتایج سناریو کاهش تغذیه بر اثر خشکسالی نشان دهنده کاهش میزان تغذیه سطحی و درنتیجه افت سطح ایستابی و افزایش شبیه‌سازی به طرف آبخوان و درنهایت تغذیه بیشتر آبخوان توسط رودخانه می‌شود. سناریو افزایش تغذیه آبخوان بر اثر ترسالی نیز باعث افزایش سطح ایستابی و تغذیه سطحی آبخوان می‌شود. این امر باعث کاهش اختلاف سطح ایستابی و تراز آب رودخانه شده که درنتیجه آن شبیه‌سازی به طرف آبخوان می‌یابد.

نتایج تحقیق‌های مختلف نشان داده است مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW قادر است مقادیر تغذیه حاصل از بارش و نشت از رودخانه‌ها، کانال‌های آبیاری و انهار سنتی بر اساس الگوی متفاوت تشکیل روابط و برداشت از منابع سطحی و زیرزمینی و همچنین، تغذیه ناشی از مدیریت‌های آبیاری در پهنه‌های مختلف دشت را برآورد کند (Bailey et al., 2016; Dowlatabadi and Zomorodian, 2016; Chunn et al., 2019). مزیت مهم دیگر مدل تلفیقی امکان بررسی مؤلفه‌های بیلان و اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی تحت تأثیر شبیه‌سازی هیدرولیکی در مقیاس‌های زمانی و مکانی است. درنتیجه با توجه به تغییرات شبیه‌سازی سطح ایستابی تحت الگوهای مختلف برداشت می‌توان الگوی برداشت از چاهها تحت سناریوهای مختلف را مدیریت کرد (Bedekar et al., 2012; Izady et al., 2012).

بیش از دو دهه از روند سریع خشک شدن دریاچه ارومیه می‌گذرد. وضعیت کنونی دریاچه ارومیه حاصل عملکرد مجموعه‌ای از عوامل انسانی و طبیعی طی دهه‌های گذشته است و ایجاد دریاچه ارومیه همچنان در صدر مطالبات محیط‌زیست کشور قرار دارد. کاهش جریان رودخانه‌ها سهم عمده‌ای را در افت میزان ورودی به دریاچه داشته است. به طور مشخص، اندازه‌گیری‌های میدانی در ایستگاه آب‌سنگی گردیده‌قوچ در انتهای رودخانه مهاباد واقع در حوضه مهاباد چای نشان دهنده کاهش شدید سهم جریانات سطحی ورودی به دریاچه ارومیه است. همچنین از دیگر موارد سوء مدیریت در محدوده دشت مهاباد، می‌توان به مشکل بالاًمدگی سطح آب زیرزمینی اشاره کرد، به طوری که قابلیت کشاورزی در بخشی از اراضی (حدود ۶۰۰۰ هکتار اراضی پایین دست شبکه و متنه‌ی به دریاچه) را محدود کرده است (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014).

الگوی تأمین آب موردنیاز و بهره‌برداری توأم از منابع آب سطحی و زیرزمینی ضرورت استفاده از مدل‌های جامع برای ارزیابی و مدیریت یکپارچه منابع آب سطحی و زیرزمینی را نشان می‌دهد.

شبیه‌سازی آبهای سطحی برای برآورد تغذیه و تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس حوضه آبریز و واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (Hydrologic Response Units) (Hydrologic Response Units) (SWAT) در شبیه‌سازی آب زیرزمینی به دلیل ساده‌سازی‌های مازول آب زیرزمینی آن و تفکیک آبخوان به دو بخش آبخوان کم‌عمق و عمیق دارای محدودیت است. نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد تلفیق مدل‌های SWAT و MODFLOW به خوبی قادر به شبیه‌سازی تبادلات بین جریان آبهای سطحی و زیرزمینی با ابعاد مختلف مکانی و زمانی است (Sophocleous and Perkins, 2000; Bejranonda et al., 2007; Chu et al., 2010).

درواقع استفاده از مدل تلفیقی، نه تنها محدودیت‌های دو مدل را بهبود بخشدید؛ بلکه خصوصیات زمانی-مکانی محدوده موردنظر را به طور مناسبی منظور می‌کند (Kim et al., 2008; Wei et al., 2018; Park and Bailey, 2017 & al., 2018).

پایش تبادلهای سطح ایستابی و جریان‌های سطحی در دامنه حریم جریان‌های طبیعی حائز اهمیت است. در مطالعه‌ای اندرکنش بین آبخوان و رودخانه در دشت بجنورد به وسیله مدل MODFLOW بررسی شد. نتایج حاصل از بیلان نشان داد تبادلهای بین آبخوان و رودخانه در این منطقه قابل توجه است به طوری که رودخانه در یک قسمت از مسیر خود حدود ۲/۴ میلیون متر مکعب در سال آبخوان را تغذیه می‌کند و در قسمتی دیگر زهکش کننده آبخوان می‌باشد (Sarvari et al., 2019).

همچنین، Heydari et al. (2019) وضعیت آبخوان و ارتباط آبهای سطحی و زیرزمینی دشت صحنه-بیستون با رودخانه گاماسیاب واقع در استان کرمانشاه را با استفاده از مدل MODFLOW شبیه‌سازی و ارزیابی کردند. نتایج به دست آمده از مدل نشان داد رودخانه عمده‌ترین عامل تغذیه کننده آبخوان به میزان ۲۴/۸۸ میلیون مترمکعب در سال و مهم‌ترین عامل تخلیه کننده آبخوان، پمپاژ از چاههای بهره‌برداری به میزان ۳۶/۰۴ میلیون مترمکعب در سال است. به طوری که رودخانه گاماسیاب آبخوان را در دو ناحیه تغذیه می‌کند و در سایر نواحی آبخوان را به میزان ۱۵/۳۵ میلیون مترمکعب در سال زهکشی می‌کند. در مطالعه دیگر، Chitsazan و Movahedian (2016) اثر مقابله آبخوان و رودخانه کارون در دشت گتوند-عقیلی را با استفاده از مدل MODFLOW بررسی کردند. سپس ارتباط رودخانه کارون با آبخوان در سناریوهای مختلف مدیریتی شامل افزایش و کاهش سطح آب رودخانه در اثر بهره‌برداری از دو سد گتوند (علیا و تنظیمی) و پیش‌بینی روابط مقابله آبخوان و رودخانه در دوره‌های خشکسالی و ترسالی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که رودخانه کارون در نواحی شمالی و بهخصوص مرکزی دشت زهکش آبخوان است. در حالی که در نواحی جنوبی و بخش‌های جنوب شرقی دشت باعث تغذیه آبخوان می‌گردد. به طور کلی نتایج نشان داد تأثیر سازه‌های آبی مختلف همچون سدهای گتوند بر تبادل جریان میان آبخوان دشت گتوند- عقیلی و رودخانه کارون

به طوری که تبادل‌های منابع آب سطحی و زیرزمینی با توجه به شبیه هیدرولوکی آب زیرزمینی و جریان رودخانه برآورد گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی حوضه مهاباد چای با وسعت ۱۵۱۶ کیلومترمربع در شمال غربی ایران و جنوب غربی حوضه آبریز دریاچه ارومیه واقع شده است. موقعیت این محدوده در کشور و حوضه آبریز دریاچه ارومیه در شکل (۱) نشان داده شده است. آبخوان مهاباد با مساحت حدود ۲۵۳ کیلومترمربع در این محدوده واقع شده است. اقلیم منطقه دارای آبوهواهی نیمه‌خشک است. متوسط بارندگی سالانه، ۴۰۲ میلی‌متر در طول دوره آماری سال آبی ۶۹-۱۳۶۸ تا ۱۳۹۷-۹۸ ثبت شده است. روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در طول ۲۳ سال (۱۳۷۵-۹۸) نشان می‌دهد سطح آب زیرزمینی به میزان ۱/۵ متر افت داشته است که متوسط سالانه آن برابر با شش سانتی‌متر در سال است. تغییر در سطح آب زیرزمینی عمدتاً به دلیل برداشت آب برای تأمین آب آبیاری و تبخیر از آب زیرزمینی به دلیل بالا بودن سطح آب زیرزمینی در مناطق شمالی دشت است. به طور کلی روند اصلی تراز سطح آب در دشت مهاباد در سال‌های اخیر متداول بوده و افت مشاهده شده ناچیز است.

علاوه بر لزوم تلفیق مدل‌های آب سطحی و زیرزمینی، امكان استفاده از نتایج مدل‌های آب سطحی، به عنوان ورودی‌های سامانه آب زیرزمینی و همچنین لحاظ کردن تأثیر سامانه آب زیرزمینی در منطقه غیراشباع به خصوص منطقه توسعه ریشه در ارائه تصویر جامعی از تبادل‌های منابع آب سطحی و زیرزمینی ضروری است. به طور مشخص در حوضه دریاچه ارومیه که بهشت تحت تأثیر پهنه‌برداری ناپایدار از منابع آب قرار گرفته، از این نوع مدل‌ها می‌توان برای حداکثرسازی تأمین حفابه دریاچه ارومیه از طریق الگوی تأمین نیاز آبیاری اراضی کشاورزی از منابع تلفیقی استفاده کرد. این گونه مدل‌ها قادرند اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی در پهنه‌های مختلف دشت و آبخوان متناسب با تقاضاهای سهم تأمین آب کشاورزی از منابع آب تلفیقی را شبیه‌سازی کنند. بنابراین هدف عملده این مطالعه، بررسی اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از یک مدل تلفیقی آب سطحی و آب زیرزمینی در تأمین آب کشاورزی در دشت مهاباد در حوضه آبریز دریاچه ارومیه است. در این دشت علاوه بر عبور رودخانه مهاباد چای به طول ۲۶ کیلومتر از مرکز حوضه، وجود شبکه گسترهای از انهار طبیعی به طول بیش از ۱۸۰ کیلومتر تبادل‌های آب‌های سطحی و زیرزمینی قابل توجهی در پهنه‌های مختلف دشت ایجاد نموده است. از این رو در مطالعه حاضر برهمکنش بررسی سطح ایستایی و جریان‌های سطحی در دامنه حریم جریان‌های طبیعی با یک مدل تلفیقی انجام گردید.

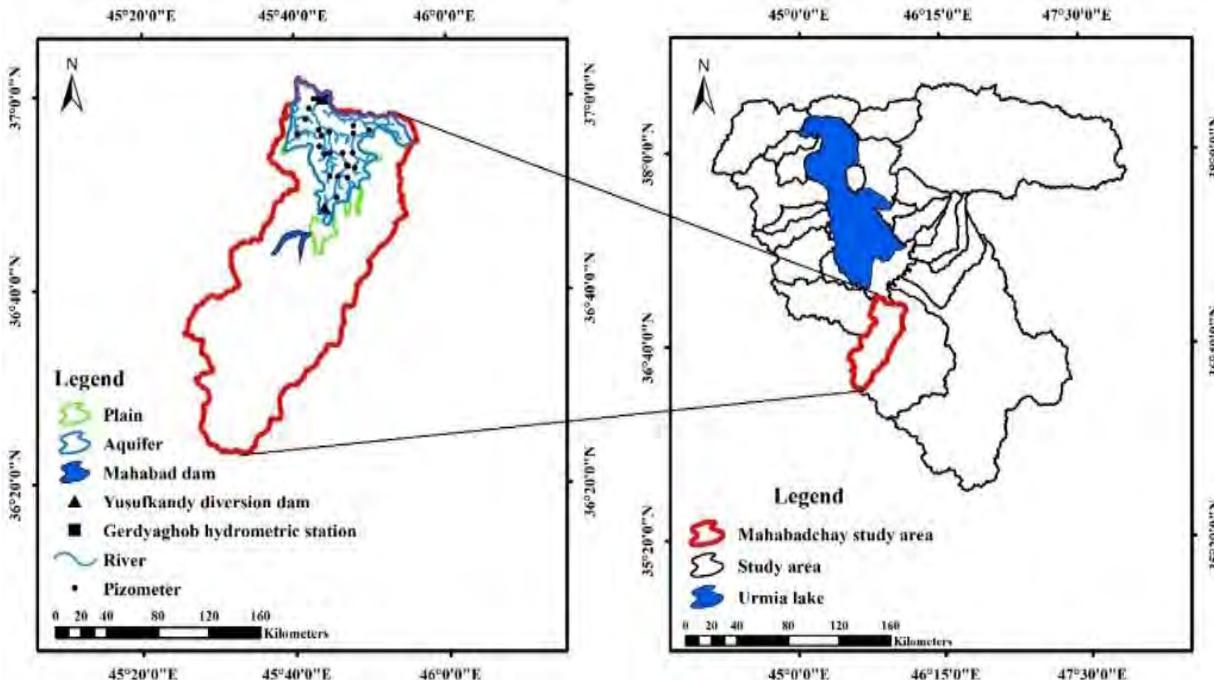


Fig. 1- Location of Mahabad study area, plain and aquifer in Urmia Lake Basin

شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی، دشت و آبخوان مهاباد در حوضه آبریز ارومیه

بسته شبیه‌ساز جریان رودخانه (River package) با ساده‌سازی نحوه‌ی ارتباط بین آبخوان و رودخانه و تبادل جریان را معطوف به دو عامل اختلاف هد و ضریب هدایت بستر رودخانه می‌نماید (Chitsazan et al., 2016). بسته به اینکه ارتفاع آب زیرزمینی بالاتر از ارتفاع آب در رودخانه و یا پایین‌تر از آن باشد منجر به تغذیه یا زهکشی آب زیرزمینی می‌شود. فرض بر این است که افت بار بین رودخانه و آبخوان محدود به خود لایه بستر است؛ یعنی، افت بار قابل توجهی بین کف لایه بستر و گره زیرین رخ نمی‌دهد. به علاوه، فرض می‌شود که سلول تحتانی مدل، اشباع باقی می‌ماند؛ یعنی، سطح آب هیچ گاه پایین‌تر از کف لایه بستر نمی‌آید. با این فرضیات جریان آب رودخانه و سامانه آب زیرزمینی از رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$Q_{RIV} = C_{RIV}(H_{RIV} - h_{i,j,k}) \quad (2)$$

که در معادله بالا مقدار هدایت‌پذیری کف رودخانه (C_{RIV}) از معادله (۳) برآورد می‌شود:

$$C_{RIV} = \frac{KLW}{M} \quad (3)$$

در معادله‌های بالا Q_{RIV} میزان آب مبادله شده بین سلول‌های مرزی و رودخانه ($\frac{l^3}{T}$)، H_{RIV} بار جریان در رودخانه (L)، C_{RIV} هدایت‌پذیری کف رودخانه و h بار آب و یا در حالتی که سطح آب پایین‌تر از کف رودخانه باشد، ارتفاع بستر رودخانه (L) است. Q_{RIV} جریان بین رودخانه و آبخوان است که در جهت ورود به آبخوان مثبت در نظر گرفته می‌شود. H_{RIV} بار هیدرولیکی در رودخانه، C_{RIV} "رسانایی" هیدرولیکی لایه ارتباطی رودخانه – آبخوان ($\frac{KLW}{M}$) و $h_{i,j,k}$ بار هیدرولیکی در گره سلول زیرین این بازه از رودخانه می‌باشد. اگر فرض شود که لایه بستر رودخانه اشباع از آب باقی بماند، بار هیدرولیکی در قاعده آن به طور ساده برابر ارتفاع آن نقطه خواهد بود که با RBOT نشان داده می‌شود و درنتیجه جریان از درون لایه بستر به صورت رابطه (۴) خواهد بود:

$$Q_{RIV} = C_{RIV}(H_{RIV} - RBOT) \quad (4)$$

واضح است که افت بیشتر بار هیدرولیکی به سطحی پایین‌تر از RBOT، باعث افزایش جریان از لایه بستر نخواهد شد، بلکه تا زمانی که بار هیدرولیکی پایین‌تر از RBOT باقی بماند، مقدار جریان با مقدار ثابت داده شده در فرمول فوق برابر خواهد بود. این

MODFLOW مدل

MODFLOW اوین بار در سازمان زمین‌شناسی آمریکا تهیه و از آن زمان تاکنون نسخه‌های فراوانی از آن منتشرشده است (McDonald and Harbaugh, 2003). این مدل با توجه به قابلیت‌های زیاد و داشتن بسته‌های مختلف که باقابلیت شبیه‌ساز مؤلفه‌های مختلف سامانه آبی یک مدل جامع در مدل‌سازی عددی یک سامانه اشباع و تشکیلات آبرفتی است. مدل MODFLOW یک مدل سه‌بعدی جریان اشباع، تفاضل محدود و Block-centered است که جریان آب زیرزمینی در محیط متخلخل را شبیه‌سازی می‌کند (McDonald and Harbaugh, 1988). برنامه‌ی مذکور به دلیل قابلیت و اعتبارستجو گسترده به عنوان یک مدل استاندارد جریان آب زیرزمینی پذیرفته شده و در شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل حالات‌های پایدار و ناپایدار استفاده می‌شود (Palma et al., 2007; Bedekar et al., 2012).

MODFLOW، مدلی فیزیک محور و کاملاً توزیعی است که معادله دارسی با بیلان جرم در جریان آب زیرزمینی استفاده می‌کند (Harbaugh, 2005; Kim et al., 2008). مدل MODFLOW از معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی برای شبیه‌سازی جریان استفاده می‌کند. معادله دیفرانسیل جزئی ذیل که از ترکیب سه بعدی معادله دارسی و معادله پیوستگی حاصل می‌شود، معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی در محیط اشباع است:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} \pm w \quad (1)$$

که در آن S_s ضریب ذخیره ویژه (I/L)، h بار آبی، t زمان، K_{xx} و K_{zz} به ترتیب مقادیر هدایت هیدرولیکی در جهت‌های x و z است. W شار جریان حجمی در واحد حجم (L/T) که برای تخلیه منفی و برای تغذیه مثبت منظور می‌شود. این معادله با توجه به شرایط آبخوان مورد مطالعه مبنی بر همگن یا غیر همگن بودن، همرونده یا غیرهمنرونده بودن و مانندگار یا نامانندگار بودن قابل ساده‌سازی است.

این مدل برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی شامل یک برنامه اصلی و تعداد زیادی برنامه‌های فرعی بوده که این برنامه‌های فرعی در تعدادی بسته‌های مستقل دسته‌بندی شده‌اند. هر بسته برای شبیه‌سازی یکی از مؤلفه‌های هیدرولوژیکی نظریه تغذیه از رودخانه، تخلیه توسط زهکش، برداشت آب توسط چاه برای حل معادله‌های خطی جریان با یک روش خاص به کار می‌رود. به طوری که هر کدام از بخش‌های محاسباتی و هیدرولوژیکی به گونه‌ای ایجاد شده‌اند که مستقل از یکدیگر عمل می‌کنند و به دلیل وجود این ساختار بخش‌ها و گزینه‌های جدیدی را می‌توان به مدل افزود بدون آنکه نیاز به تغییر در بخش‌های موجود باشد.

ساختار مدل‌سازی SWAT-MODFLOW-NWT

داده‌های مورد استفاده در ساختار مدل‌سازی تلفیقی-SWAT-MODFLOW-NWT در شکل (۲) نشان داده است. برای تهیه مدل کمی و شبیه‌سازی جریان آبخوان مهاباد در مدل MODFLOW-NWT در نرم‌افزار GMS پوشش‌های (Coverages) مختلفی شامل رقوم سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای، دبی چاه‌های بهره‌برداری، نوع مرزهای محدود آبخوان، ورودی و خروجی‌های آب‌های سطحی و زیرزمینی، رقوم سنگ کف، لایه شناسی آبخوان، خصوصیات هیدرولوژیکی و هیدرودینامیکی آبخوان (داده‌های هدایت هیدرولیکی، قابلیت انتقال، ضریب ذخیره، آبدهی ویژه)، موقعیت چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای در سطح سلول‌های واقع در محدوده مدل‌سازی و مقادیر تعیینی حاصل از مدل SWAT به مدل MODFLOW-NWT تعریف شد (Raja et al., 2021).

در این مطالعه از نقشه DEM SRTM در مقیاس ۳۰ متر در تهیه تمامی نقشه‌های آب زیرزمینی و هندسه آبخوان مهاباد مانند مرز آبخوان، تراز آب زیرزمینی، سنگ کف و غیره استفاده شد (شکل ۳a). با توجه به اطلاعات موجود، آبخوان مهاباد به صورت تک لایه در نظر گرفته شد. شبکه چاه‌های پیزومتری به منظور اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی این آبخوان آبرفتی از سال ۱۳۶۹ در دشت مهاباد آغاز شده است. طبق بررسی‌های انجام شده، از آمار و اطلاعات ۲۲ حلقه چاه پیزومتر که سطح آب زیرزمینی به صورت ماهانه در آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود در طول دوره شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۳b).

علاوه بر رودخانه مهاباد چای به طول ۲۶ کیلومتر، شبکه انهرار طبیعی به طول ۱۸۳/۵ کیلومتر در دشت وجود دارد. سطح آب زیرزمینی در دشت بسیار بالا است و اندرکنش بین آبخوان و رودخانه در سرتاسر دشت وجود دارد. برای شبیه‌سازی دقیق اثر رودخانه‌ها و آبراهه‌ها در مدل، اطلاعات مربوطه به موقعیت مکانی رودخانه، سطح آب، شبکه رستر و روابط دبی-اشنل رودخانه‌ها از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی اخذ گردید. برای تقویت اطلاعات ورودی در فرآیند مدل‌سازی از سایر اطلاعات گزارش شده همچون اطلاعات خروجی برآورده شده از مدل SWAT شامل خصوصیات شبیب، پهنا و عمق رودخانه اصلی مهاباد و کلیه رودخانه‌های فرعی و نیز تصاویر ماهواره‌ای (Google Earth) استفاده شد (Nayyeri, 2015, Raja et al., 2021). شبکه رودخانه استفاده شده در فرآیند مدل‌سازی در شکل (۳b) نشان داده شده است. جبهه‌های ورودی و خروجی آبخوان به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مهم تغذیه آبخوان با استفاده از نقشه تراز سطح ایستایی، خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی و جهت جریان آب زیرزمینی مشخص و به عنوان شرایط مرزی به مدل معرفی شد. بررسی خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی نشان داد آبخوان مهاباد دارای سه مقطع ورودی، یک مقطع خروجی و دو جبهه نفوذناپذیر است (شکل ۳c).

فرضیات برای شبیه‌سازی ارتباط رودخانه و آبخوان در استفاده می‌شود، یعنی، جریان بین یک رودخانه و گره i,j,k بر اساس معادله (۵) نوشته می‌شود:

$$\begin{cases} QRIV = CRIV(HRIV - h_{i,j,k}) & , h_{i,j,k} > RBOT \\ QRIV = CRIV(HRIV - RBOT) & , h_{i,j,k} \leq RBOT \end{cases} \quad (5)$$

زمانی که $h_{i,j,k}$ برابر یا هم‌سطح آب رودخانه $HRIV$ گردد، مقدار این جریان برابر صفر خواهد بود و برای مقادیر بزرگ‌تر $h_{i,j,k}$ جریان منفی، یعنی جریان به سمت رودخانه است. برای مقادیر کمتر $h_{i,j,k}$ ، جریان مثبت، یعنی جریان به سمت آبخوان صورت می‌گیرد. این جریان مثبت با کاهش $h_{i,j,k}$ به طور خطی افزایش می‌یابد تا زمانی که $h_{i,j,k}$ به حد $RBOT$ تنزل یابد، پس از آن جریان ثابت باقی می‌ماند (Chitsazan and Kashkuli, 2002).

بسته‌های شبیه‌ساز تبخیر و تعرق شامل EVT یا ETS در مدل MODFLOW از روش تقریب خطی برای برآورد تبخیر از سطح آب زیرزمینی استفاده می‌کنند. هرچه فاصله سطح ایستایی آب زیرزمینی از سطح زمین کمتر باشد، مقدار تبخیر از آب زیرزمینی بیشتر خواهد بود. در این روش نخ تبخیر روی سطح زمین و حداکثر ارتفاعی که در آن تبخیر از آب زیرزمینی رخ می‌دهد توسط کاربر مشخص می‌گردد و بسته شبیه‌ساز تبخیر با استفاده از داده‌های دریافتی از کاربر یک تقریب خطی ساده (در بسته EVT) یا یک تقریب دوخطی (ETS) از پروفیل نخ تبخیر در عمق زمین ایجاد نموده و میزان آب خارج شده از آبخوان را برآورد می‌نماید. به طور کلی، بسته تبخیر برای شبیه‌سازی تبخیر مستقیم و خروج آب از منطقه اشباع آب زیرزمینی به کار رود و بر سه اصل زیر مبنی است. اگر سطح ایستایی بالاتر یا هم‌سطح با سطح مشخصی تحت عنوان سطح تبخیر (The evapotranspiration surface) باشد، تلفات ناشی از تبخیر از آبخوان با شدت بیشینه (elevation) انجام می‌گیرد. اگر عمق سطح ایستایی از سطح (Maximum ET rate) معینی تحت عنوان عمق توقف یا قطع (The extinction depth) باشد، تبخیر متوقف می‌شود. درنهایت بین این دو حد، میزان تبخیر از سطح ایستایی نسبت به ارتفاع سطح ایستایی به صورت خطی تغییر می‌کند (Chitsazan and Kashkuli, 2002).

یکی از نسخه‌های جدید مدل MODFLOW-NWT است که در این تحقیق از آن برای شبیه‌سازی تبادلهای آب زیرزمینی دشت مهاباد استفاده شد. در مدل MODFLOW-NWT از فرمول نیوتون برای حل مشکلات مربوط به خشک شدن سلول‌ها و دوباره خیس شدن غیرخطی در معادله زیرزمینی جریان غیر محصور استفاده می‌کند (Niswonger et al., 2011). این قابلیت در نسخه‌های قبلی MODFLOW وجود نداشت و از نقاط ضعف مدل محسوب می‌شد. این مدل باید با بسته Upstream-Weighting(UPW) استفاده شود. این بسته برای محاسبه قابلیت هدایت داخل سلولی از روشی متفاوت از روش Block-Centered Flow (BCF) استفاده می‌کند.

می باشد که همواره نحوه تشخیص آن در طی فرایند مدل سازی، با دشواری زیادی با توجه به محدودیت داده های موجود همراه است. در منابع مختلف روش های مختلفی از جمله اندازه گیری های مستقیم میدانی در چند نقطه از بستر رودخانه (که نیازمند تجهیزات خاصی می باشد)، تخمین آن براساس ضریب هدایت هیدرولیکی داشت در محل بستر رودخانه و یا تخمین آن براساس مواد بستر رودخانه معرفی شده است. بررسی کامل این روش ها منجر به آن شد تا در مدل آب زیرزمینی داشت مهاباد مسیل رودخانه مهاباد به سه قسمت ورودی به داشت، میانی و پایاب تقسیم شده و برای هریک از آن ها میزان حداقل و حداکثر ضریب هدایت کف رودخانه و آبراهه ها با توجه به مقادیر مطرح شده در گزارشات و مقالات علمی Water Consulting Engineers and (Sustainable Development, 2014; Nayyeri, 2015) و مقادیر پهنه بندی شده قابلیت انتقال و هدایت هیدرولیکی در سطح داشت تعیین شود؛ لذا برای تعیین مقدار دقیق ضریب هدایت هیدرولیکی کف رودخانه نیز محدوده تغییرات ضریب هدایت کف رودخانه ها برای سه بازه ورودی، میانی و پایاب داشت بین سه تا ۱۵ متر در روز فرض شد. برای تقویت اطلاعات ورودی از سایر داده ها همچون نتایج خروجی برآورده شده مربوط به آبراهه های فرعی از SWAT شامل خصوصیات شبیه، پهنا و عمق رودخانه اصلی مهاباد و کلیه آبراهه ها، اطلاعات گزارش شده در مقالات علمی Google (2015) و نیز اطلاعات تصاویر ماهواره ای (Earth (Raja et al., 2021) استفاده شد. پس از بررسی کلیه اطلاعات جمع آوری شده، اطلاعات مقطع رودخانه بر اساس عمق و پهنا تهیه و به مدل معرفی شد.

در این مطالعه، از مقادیر تعذیه حاصل از مدل SWAT در مدل سازی آب زیرزمینی MODFLOW-NWT استفاده شد (Development, 2014). میزان تعذیه (نفوذ عمقی) ناشی از تلفات آب آبیاری و نفوذ از بارندگی از پروفیل غیر اشاع خاک حاصل می شود. بر اساس فرضیات مدل SWAT هنگامی که ذخیره رطوبتی خاک در هر لایه بیش از ظرفیت زراعی باشد، نفوذ عمقی به لایه بعدی رخ می دهد. پارامتر GW_RCHG در پرونده های خروجی مدل در قسمت Output.hru بیانگر تعذیه به آبخوان است. میزان تعذیه سالانه وارد شده به مدل به طور متوسط از ۱۷ تا ۳۶۳ میلی متر متغیر بود (شکل ۳h).

چاه های بهره برداری یکی از مهم ترین روش های تأمین آب در دشت مهاباد است. موقعیت چاه های بهره برداری در محدوده آبخوان مهاباد در شکل (۳d) نشان داده شده است که آمار و اطلاعات آن ها در طی فرآیند مدل سازی به مدل تعریف شد. بررسی ها بهره برداری از چاه ها افزایش یافته است. به طوری که بر اساس آمار موجود، میزان برداشت از آب زیرزمینی در سطح داشت از ۱۲/۹۰ میلیون مترمکعب در سال آبی ۱۳۸۹-۹۰ به ۵۵/۲۰ میلیون مترمکعب در سال ۹۸-۹۷ افزایش یافته است. اطلاعات لازم در مراحل مدل سازی بر اساس گام های زمانی ماهانه به مدل معرفی شد.

پس از بررسی های لازم از اطلاعات جمع آوری شده از نقشه های زمین شناسی، لوگ چاه های پیزومتری، اکتشافی و بهره برداری (۹۴) حلقه چاه جهت رسم رقوم سنگ بستر نسبت به تراز سطح زمین در نرم افزار Arc GIS استفاده شد. به طور کلی رقوم سنگ کف آبخوان از تراز ۱۲۳۲ تا ۱۲۸۴ متر متغیر است. ضخامت سنگ بستر نیز حدود ۶۰-۱۶ متر زیر سطح زمین است (شکل ۳e).

ضرایب هیدرودینامیک از جمله ضرایب هدایت هیدرولیکی (K)، قابلیت انتقال (T) و آبدی ویژه (S_y) از مهم ترین عوامل کنترل کننده جریان آب زیرزمینی می باشد. در این مطالعه برای تعیین ضرایب هیدرودینامیک از منابع اطلاعاتی مختلف از قبیل آزمایش پمپاژ در چاه ها و بر اساس دانه بندی نمونه خاک استفاده شد (Davis and De Wiest, 1996). بررسی ها نشان داد مقادیر هدایت هیدرولیکی از ۲/۵ تا ۱۳ متر در روز در سطح آبخوان متغیر است (شکل ۳f). به طور کلی نواحی شمالی و شمال غربی آبخوان به دلیل وجود رسوبات دانه ریز کمترین مقدار و نواحی جنوبی و جنوب غربی بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی را نشان می دهند Water Consulting Engineers and Sustainable (Development, 2014). همچنین، میزان آبدی ویژه در سطح منطقه از ۰/۴ تا ۳/۶ درصد متغیر است (شکل ۳g). بررسی مطالعات پیشین به منظور تعیین آبدی ویژه نیز نشان می دهد مقدار آن بین Valizadegan and Yazdanpanah, 2018; Water Consulting Engineers (and Sustainable Development, 2014) تعیین میزان ضریب هدایت کف رودخانه ها نیز یکی دیگر از چالش های مدل کردن رودخانه ها در مدل سازی آب زیرزمینی

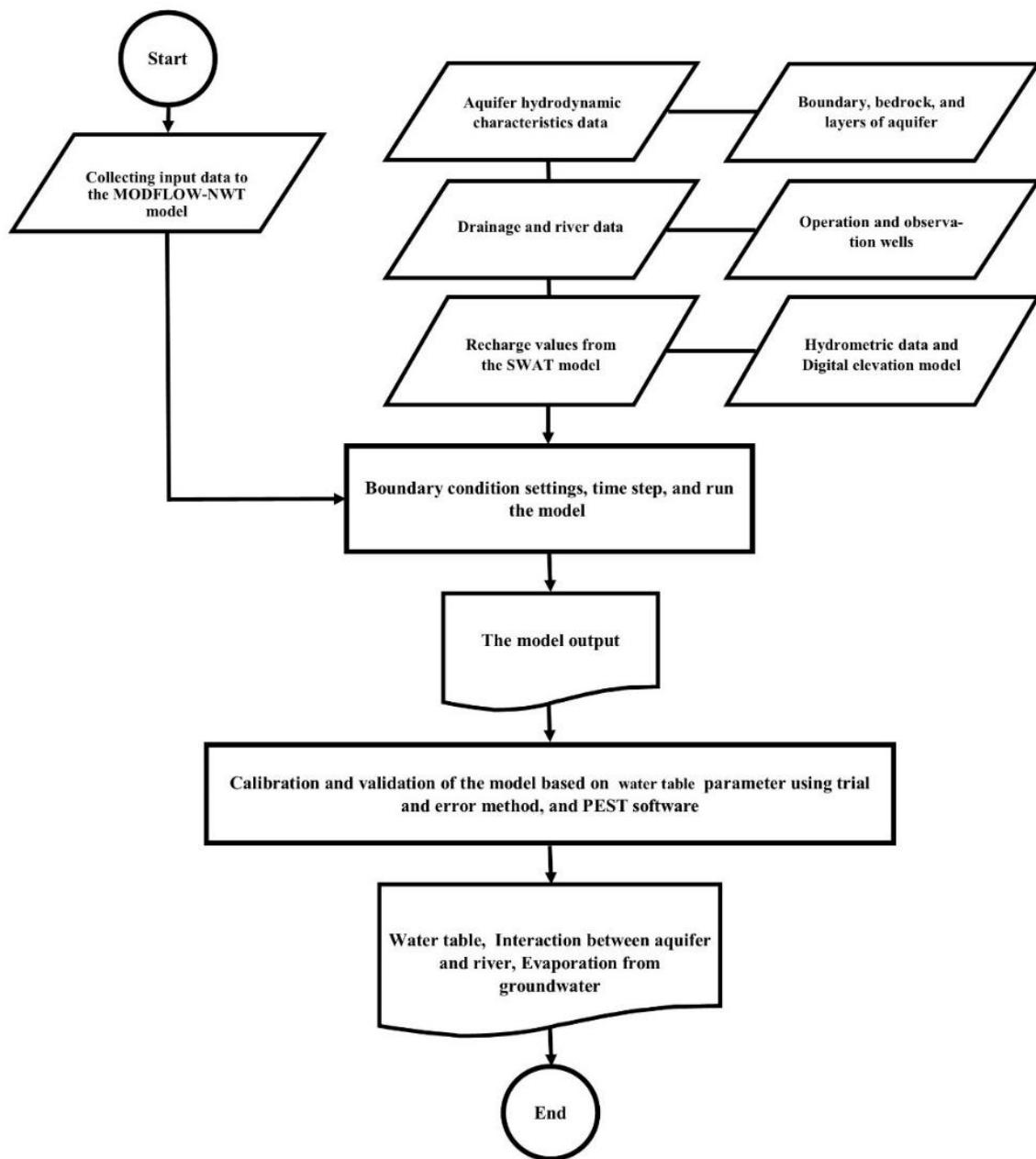
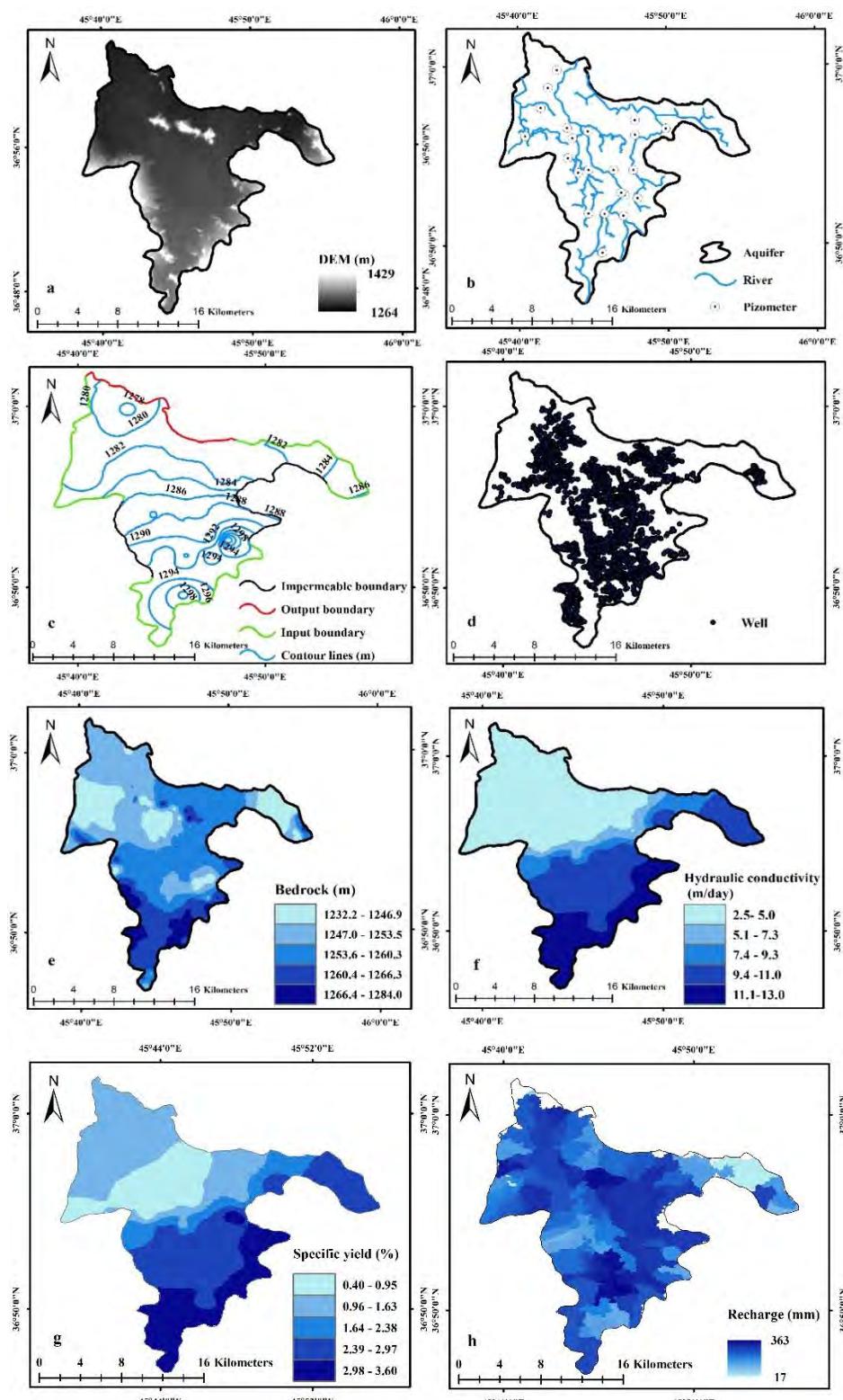


Fig. 2 – Data used in coupled SWAT-MODFLOW-NWT modeling structure
شکل ۲ – داده‌های مورد استفاده در ساختار مدل‌سازی تلفیقی SWAT-MODFLOW-NWT



3- a) Digital elevation model (DEM) with a scale of 30 meters, b) Location of piezometric wells, .Fig c) Inlet, outlet, impermeable boundaries, and groundwater contour lines, d) Location of wells, e) Values Aquifer bedrock, f) Hydraulic conductivity values, g) Specific yield values and, h) Recharge values.

شکل ۳- (a) مدل رقومی ارتفاع (DEM) با مقیاس ۳۰ متر، (b) موقعیت چاههای پیزومتری و شبکه رودخانه، (c) مرزهای ورودی، خروجی، نفوذناپذیر و خطوط هم تراز آب زیرزمینی، (d) موقعیت چاهها، (e) مقادیر سنگبستر آبخوان، (f) مقادیر هدایت هیدرولیکی، (g) مقادیر آبدهی ویژه و (h) تقدیمه سالانه آب زیرزمینی

به طور کلی حساسیت ضریب هدایت هیدرولیکی بیشتر از سایر پارامترها بود؛ بنابراین در ابتدا به منظور درک واکنش مدل به تغییر پارامترها، واسنجی به روش سعی و خطا انجام شد. سپس، از الگوریتم PEST (Parameter estimation) به عنوان یک برآورده‌گر غیرخطی به منظور دستیابی به واسنجی بهینه استفاده شد (Doherty et al., 1994).

واسنجی مدل در شرایط ماندگار بر اساس مقدار اولیه ضریب هدایت هیدرولیکی به صورت دستی و آزمون خطاباً استفاده از نتایج آزمون‌های پمپاژ و اطلاعات تهیه شده از آب منطقه‌ای آذربایجان غربی انجام شد. این مقادیر باید بر اساس خصوصیات منطقه تعییر می‌کردند. به طوری که تعیین مقادیر مطلوب باید در محدوده واقع‌بینانه متناسب با شرایط منطقه (مقادیر بیان شده در بخش ورود داده‌ها به مدل) به دست می‌آمد. در گام بعدی، پس از تخمین مقادیر اولیه ضرایب هیدرودینامیکی برای کاهش اختلاف تراز آب محاسباتی و مشاهده‌ای در چاههای مشاهده‌ای، مدل برای شرایط غیرماندگار با استفاده از داده‌های متغیر بازمان، نظیر آبدی چاههای بهره‌برداری، تنذیه و تراز آب اندازه‌گیری شده در چاههای مشاهده‌ای اجرا شد. در شرایط ناماندگار، مدل بر اساس مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی (K)، ضریب آبدی ویژه (S_y)، هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه و انهار طبیعی و تنذیه آب زیرزمینی به صورت خودکار و به کمک روش PEST در نرم‌افزار GMS باهدف تعابیر مقادیر تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در چاههای مشاهده‌ای واسنجی شد. به طوری که در مدل هدایت هیدرولیکی (K) و آبدی ویژه (S_y) به عنوان پارامترهای مجهول در PEST تعیین می‌شوند. روش پنهانه‌بندی (ZM) و روش پیلوت منظم (RPP) به ترتیب برای پارامترهای S_y و K استفاده شدند (Doherty, Moor and Doherty, 2003; 2006). در روش ZM، دامنه مدل به چندین زیردامنه با مقدار ثابت S_y تقسیم شد زیرا مجهول‌ها در یک فرآیند واسنجی تنظیم می‌شوند. در روش RPP، ابتدا مجموعه‌ای از نقاط با پراکندگی دو بعدی در سرتاسر دامنه مدل توزیع می‌شود که مقادیر معقول و منطقی K از آن اختصاص داده می‌شود.

سپس این مقادیر از طریق واسنجی تخمین زده می‌شوند. پس از آن، مقادیر «واقعی و واسنجی شده» برای سلول‌های دیگر مدل با استفاده از یک روش درون‌یابی فضایی مانند Kriging محاسبه می‌شود. واسنجی داده‌های تنذیه نیز در ابتدا برای یک ماه در حالت ماندگار آغاز شد، پس از آن واسنجی بر اساس داده‌های تنذیه ماهانه متغیر در طول دوره شبیه‌سازی در شرایط ناماندگار استفاده شد. در نهایت مدل MODFLOW-NWT بر اساس مقادیر تراز سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده در چاههای مشاهده‌ای ارزیابی و واسنجی شد. از مهر سال ۱۳۸۸ تا شهریور سال ۱۳۹۴ دوره‌ی واسنجی و از مهر سال ۱۳۹۴ تا شهریور سال ۱۳۹۸ دوره‌ی اعتبارسنجی در نظر گرفته شد.

اجرای مدل

ناحیه‌ی فعال شبکه‌بندی مدل MODFLOW-NWT مساحتی حدود ۲۵۳ کیلومترمربع را دربر می‌گیرد. گستره سازی و پیکسل‌بندی مدل MODFLOW-NWT دشت مهاباد با ایجاد یک شبکه‌ی منظم تقاضلات محدود به تعداد ۳۳۴۸ با ابعاد ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر و ۱۰۱۳ سلول فعال طراحی شد. در مدل MODFLOW-NWT مرزهای با جریان ورودی و خروجی به صورت بار هیدرولیکی عمومی (General Head Boundary)، مرزهای بدون جریان به صورت بار هیدرولیکی مشخص (Specific Head Boundary) در نظر گرفته شد.

مقادیر تغذیه حاصل از مدل SWAT به عنوان داده ورودی به مدل MODFLOW-NWT اضافه شد (Raja et al., 2021). مقادیر تغذیه ماهانه در زیرحوضه‌های مدل SWAT به عنوان مرز بالا به مدل MODFLOW-NWT معرفی گردیدند. اطلاعات کامل در SWAT و MODFLOW-NWT خصوص فرآیند اتصال دو مدل (Bailey et al. 2016) تشریح شده است. مقادیر اولیه برآورد هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه برای منطقه به مدل معروف گردید. آمار میدانی مقادیر برداشت هر یک از چاههای بهره‌برداری در طول دوره شبیه‌سازی وارد مدل شد. برای شبیه‌سازی جریان ماندگار، از سطح آب اندازه‌گیری شده چاههای مشاهده‌ای در مهر سال ۱۳۸۸ به عنوان سطح آب زیرزمینی اولیه استفاده شد.

همچنین، برای شبیه‌سازی فرآیندهای پمپاژ از آبهای زیرزمینی از بسته WEL در مدل MODFLOW-NWT استفاده شد. بسته‌های ETS و RCH به ترتیب برای شبیه‌سازی تبخیر از سطح آب زیرزمینی و تنذیه آب زیرزمینی در مدل اصلی MODFLOW-NWT در نظر گرفته شد. برای بررسی اندرکنش بین منابع آب سطحی و زیرزمینی نیز از بسته RIV استفاده شد. به طور کلی برای مدل سازی غیرماندگار آبخوان مهاباد، دوره‌ی ده ساله (از سال آبی ۱۳۸۸-۸۹ تا ۱۳۹۷-۹۸) در نظر گرفته شد. از آنچاکه اندازه‌گیری عمق سطح ایستابی به صورت ماهانه انجام می‌شود، گام زمانی ماهانه و واحد زمان روزانه در نظر گرفته شد.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

در این مطالعه در ابتدا مدل با انتخاب روش ریاضی حل سامانه معادله‌های جبری که شامل تعداد تکرار و معيار خطای قابل قبول برای خاتمه فرآیند تکرار اجرا شد. اجرای اولیه مدل MODFLOW-NWT در حالت ماندگار انجام شد تا شرایط اولیه برای اجرای بعدی مدل مهیا شود. به طوری که از داده‌های سطح آب زیرزمینی به دست آمده در حالت ماندگار برای اجرای مدل در حالت ناماندگار استفاده شد. آنالیز حساسیت هر کدام از پارامترهای ضریب هدایت هیدرولیکی، آبدی ویژه و ضریب هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه و تنذیه در مرحله واسنجی موردنرسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد تعیین و اعمال میزان تغییرات مقادیر هدایت هیدرولیکی، آبدی ویژه و تعیین عامل مهمی برای دستیابی به یک واسنجی موفق بود.

نقطه‌ای و توسعه نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌ها برای کل مسیر رودخانه است. با توجه به این که امکان اندازه‌گیری میدانی ضریب هدایت کف رودخانه میسر نبود، از نتایج حاصل از مدل SWAT شامل مکان رودخانه، ابعاد بستر رودخانه و سطح آب در انهر طبیعی و اطلاعات جمع‌آوری شده از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی شامل ضریب هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه، سطح آب، شکل بستر و روابط دبی اشل رودخانه در محل ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در دشت استفاده شد. بالین حال پس از فرآیند واسنجی مدل مقادیر دقیق‌تر این پارامتر در بازه‌های مکانی مختلف در رودخانه مهاباد که عده جریانات سطحی در آن اتفاق می‌افتد محاسبه شدند. نتایج واسنجی مدل نشان داد میزان هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه در ورودی، حدفاصل ورودی و خروجی و نیز خروجی رودخانه به ترتیب $11/3$ ، $7/6$ و $2/7$ متر بر روز برآورد شد.

خطای شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در گام زمانی
در مطالعه قبلی Raja et al. (2022)، مقادیر آماره‌های عملکرد مدل شامل ضریب تبیین (R^2) و نش-ساتکلیف (NSE) بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی تراز سطح ایستابی در شرایط ناماندگار در برسی تراز سطح ایستابی برای دوره‌های مختلف واسنجی و اعتبارسنجی نشان داد مطابقت خوبی بین تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در هر دو دوره وجود دارد. به طوری که مقادیر آماره‌ها نشان داد که این دو مقدار از همبستگی بسیار زیادی برخوردارند. همچنین، نتایج معیار RMSE نیز نشان داد مقدار خطای $0/35$ و $0/34$ متر به ترتیب برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به دست آمد که نشانگر نتیجه رضایت‌بخش و مناسبی برای منطقه است. تعیین بهینه پارامترهای هدایت هیدرولیکی، آبدی ویژه و مقادیر تقدیمی به آبخوان مهم‌ترین عامل دستیابی به نتایج مطلوب بود. به طور کلی مقادیر تقدیمی یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین مؤلفه‌های ورودی در مدل سازی آب زیرزمینی در مناطق نیمه‌خشک است. در این مطالعه از مقادیر تقدیمی حاصل از مدل SWAT در فرآیند واسنجی مدل MODFLOW-NWT استفاده شد. به طور مشخص از این روش و الگو استفاده نمی‌شود. نتایج حاکی از قابل‌اعتماد بودن روش در نظر گرفته شده در تعیین میزان تقدیمی آبخوان و بهبود برآورد دیگر مؤلفه‌های بیلان آب از جمله نوسانات تراز سطح ایستابی است (Semiromi and Koch, 2019; Molina-Navarro et al., 2019; Saadatpour et al., 2019; Dowlatabadi and Zomorodian, 2016; Kouchakzadeh and Nasiri, 2015; Bailey et al., 2016).

نتایج و بحث

واسنجی پارامترهای مدل

هدایت هیدرولیکی از پارامترهای اولیه واسنجی در مدل MODFLOW-NWT بود. تعیین مقدار هدایت هیدرولیکی تأثیر زیادی بر نتایج مدل دارد. لذا در ابتدا ضریب هدایت هیدرولیکی به روش آزمون خطا و سپس به روش خودکار با استفاده از مدل PEST در شرایط ناماندگار بر اساس ضریب هدایت هیدرولیکی به دست آمده از طریق آزمایش‌های پمپاژ واسنجی شد. نتایج واسنجی نشان داد بیشترین میزان هدایت هیدرولیکی در نواحی جنوبی و مرکزی دشت و نیز در نواحی شمال سرقي به میزان $12/5$ متر در روز و کمترین مقدار نیز در حاشیه شمالی و در نزدیکی خروجی دشت به میزان $2/5$ متر در روز به دست آمد. برآوردهای به دست آمده از مقادیر ضرایب هدایت هیدرولیکی با مشاهدات میدانی مطابقت دارد. با توجه به این که در نواحی شمالی دشت بافت خاک غالباً سنگین است (درصد رس زیاد)، با پیشروی از مناطق جنوب به سمت شمال آبخوان از مقادیر هدایت هیدرولیکی کاسته می‌شود (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014). واسنجی ضریب آبدی ویژه نیز یکی دیگر از گام‌های مؤثر در دستیابی به نتایج قابل قبول و رضایت‌بخش در شرایط ناماندگار بود. نتایج واسنجی مدل نشان داد میزان آبدی در ویژه در سطح منطقه از $4/0$ تا $3/6$ درصد متغیر است. نتایج نشان داد بیشترین میزان آبدی ویژه در نقاط خروجی و شمالی دشت برآورد شده است میزان آبدی ویژه در نقاط خروجی و شمالی دشت برآورد شده است که با گزارش‌های بیلان منابع و مصارف پیشین (Bian et al., 2018; Valizadegan and Yazdanpanah, 2018; Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014).

در این مطالعه از مقادیر تقدیمی حاصل از مدل SWAT به عنوان یکی از پارامترهای ورودی مهم در مدل MODFLOW-NWT استفاده شد. با توجه به این که برآورد میزان تقدیمی به آب زیرزمینی به هر روشه با عدم قطعیت رویدرو است. لذا این مقادیر به منظور تعیین دقیق‌تر آن‌ها در فرآیند واسنجی مدل در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از واسنجی نشان داد به طور متوسط حدود نه درصد از بارندگی و 36 درصد از مصارف آب در بخش کشاورزی به آبخوان نفوذ می‌کند که با مقادیر ارائه شده در گزارش‌های بیلان منابع و مصارف ($10/7$ درصد از بارندگی و $27/2$ درصد از مصارف Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014).

برآورد دقیق ضریب هدایت کف رودخانه در طول مسیر تقریباً غیرممکن بوده و تنها راه تخمين آن استفاده از اندازه‌گیری‌های

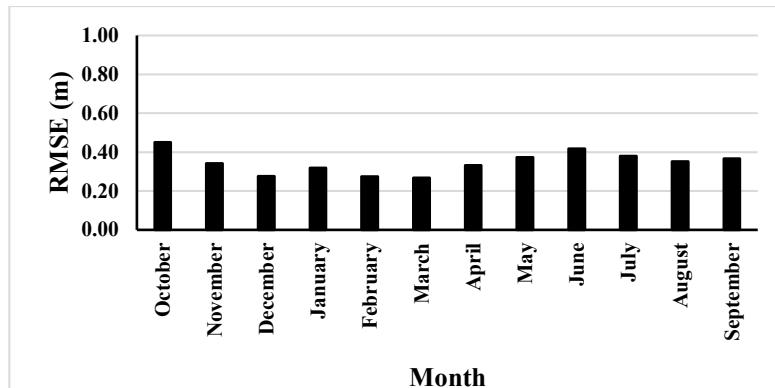


Fig. 4- Calculated error of water table level in piezometers in monthly time step

شکل ۴- خطای محاسبه شده تراز سطح ایستابی در پیزومترها در گام زمانی ماهانه

نواحی نسبت به سایر مناطق بود. بدینهی است وجود چنین خطاهای متفاوت نسبت به سایر نقاط داشت باعث پیچیده تر شدن شبیه سازی تراز آب زیرزمینی در این قسمت از منطقه مدل سازی شده است. بررسی موقعیت مکانی چاههای پیزومتری نشان می دهد میزان خطا در برخی مناطق دیگر به خصوص در پیزومترهای گردگروی و اگریقاش نزدیک به مرزهای ورودی و خروجی آبخوان نیز افزایش یافته است. عالمًا امکان برآورد دقیق آب ورودی و خروجی در قسمت مرزهای ورودی و خروجی وجود ندارد. پیزومترهای واقع در نزدیک مرز آبخوان تحت تأثیر جریان ورودی و خروجی آبخوان می باشند. از طرفی توزیع مناسبی از پیزومترها در سرتاسر مرز آبخوان برای پایش تراز آب زیرزمینی وجود ندارد. لذا این امر موجب افزایش خطا در پیزومترهای نزدیک به این مرزها شده است. سایر محققین نیز به این مسئله اشاره داشته اند که قرار گرفتن پیزومترها در نزدیکی مرزهای آبخوان و تعریف نوع شرایط مرزی تأثیر بسیار زیادی بر شبیه سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی دارد. به طوری که پیزومترهای واقع در مرکز آبخوان کمتر تحت تأثیر مقادیر ورودی و خروجی آبخوان و بالطبع تأثیر آن بر نوسانات سطح آب زیرزمینی قرار می گیرند (Hamzehkhani, 2015; Semiromi and Koch, 2019).

نتایج نشان داد میزان خطا در پیزومترهای اراضی قزل گبی، گاپیس، دارلک و لج افزایش یافته است. این پیزومترها در نزدیک رودخانه اصلی منطقه (مهاباد چای) قرار دارند. لذا تغییرات ناگهانی سطح آب در اثر وقوع سیلاب های فصلی و رهاسازی حجم آب زیاد در این رودخانه و یا بر عکس کاهش جریان آب در رودخانه در یک بازه زمانی کوتاه مدت منجر به عدم شبیه سازی دقیق تراز آب زیرزمینی در این مناطق شده است. در مطالعه Hamzehkhani (2015) نیز به تأثیر رهاسازی جریان های سیلابی در رودخانه های سیمینه و زرینه رود واقع داشت میاندوآب بر نوسانات سطح آب زیرزمینی اشاره شده است. بررسی ها نشان داد است خطاهای منطقه ای ممکن است در اثر تغییرات ناگهانی سطح آب زیرزمینی در برخی مناطق مدل سازی ایجاد شود به طوری که مدل نتواند تراز

از آماره RMSE برای بیان خطای مدل در برآورد تراز سطح ایستابی در هر گام زمانی استفاده شد. میزان خطای مدل در شبیه سازی تراز سطح ایستابی در هر گام زمانی (ماهانه) در کل دوره شبیه سازی در شکل (۴) نشان داده شده است. میزان خطای شبیه سازی توسط مدل در برخی از ماه ها مانند مهر، فروردین، اردیبهشت، خداد و شهریور نسبت به سایر گام های زمانی افزایش یافته است. مقادیر بارندگی اندازه گیری شده در ایستگاه سینوپتیک مهاباد و جریانات سطحی رهاسازی شده از سد مهاباد و جریان اندازه گیری شده در ایستگاه آب سنجی گردیده قوب نشان می دهد سیلاب ها عمده ای در ماه های مهر، فروردین و اردیبهشت اتفاق افتاده است. لذا افزایش خطا در گام های زمانی مهر، فروردین و خداد به دلیل نوسانات ناگهانی سطح آب در پیزومترهای واقع در حاشیه رودخانه مهاباد چای است. از طرفی برداشت از آب زیرزمینی برای تأمین آبیاری محصولات عمده ای در ماه های خداد تا شهریور انجام می شود؛ بنابراین افزایش خطا در گام های زمانی خداد و شهریور ممکن است به دلیل افزایش برداشت از آب زیرزمینی و درنتیجه افت موضعی سطح آب زیرزمینی در این ماه ها باشد. در سایر گام های زمانی خطای محاسبه شده در مدل مناسب است.

خطای شبیه سازی تراز آب زیرزمینی در پیزومترها

برای بیان خطا مدل بین مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده در پیزومترها از آماره RMSE استفاده شد که مقادیر آن در جدول (۱) برای دوره های واسنجی، اعتبار سنجی ارائه شده است. تقریباً میزان خطا برای اکثر پیزومترها قبل قبول است. همچنین، توزیع مکانی خطا در محدوده مدل سازی تقریباً یکنواخت بوده و در کل محدوده پراکنده است. بیشترین خطای مدل حدفاصل پیزومترهای اراضی اگریقاش و گرگ تپه (خطای ۰/۷۴ متر) و نیز گاپیش (خطای ۰/۴۵ متر) و گازله (خطای ۰/۴۹ متر) است. یکی از دلایلی که می توان به وجود خطای زیاد در این نواحی اشاره کرد افت موضعی سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای موجود در این

(آبراهه‌های متصل به رودخانه اصلی مهاباد) شامل موقعیت مکانی، بار آبی و هدایت بستر آن‌ها در مدل سازی در نظر گرفته شدند. رودخانه‌های فرعی عمدتاً به صورت فصلی دارای جریان می‌باشند. شبکه رودخانه‌های فرعی این آبراهه‌ها در شرایط واقعی به مدل امکان‌پذیر نیست. علاوه بر این، عدم ثبت برداشت از چاه‌ها همراه با چاه‌های غیرمجاز، خطای انسانی در ثبت تراز آب زیرزمینی چاه‌های مشاهداتی در پیزومترها و خطا در تخمین ضرایب هیدرودینامیک مانند هدایت هیدرولیکی می‌تواند باعث تغییرات قبل توجهی در شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی در بازه‌های زمانی شود.

Mosase et al., 2019

بررسی الگوهای مکانی-زمانی نشت آب سطحی از رودخانه به آبخوان یا زهکشی آب زیرزمینی از آبخوان به شبکه رودخانه بسیار مهم است. میزان متوسط سالانه اندرکنش بین جریانات آب سطحی و زیرزمینی شبیه‌سازی شده در نقاط مختلف دشت برای هر یک از ۳۶۲ سلول رودخانه در سال‌های آبی خشک (۱۳۹۵-۹۶)، نرمال (۱۳۹۶-۹۷) و تر (۱۳۹۷-۹۸) در شکل (۵) نشان داده شده است. مقادیر منفی نشان‌دهنده نشت از رودخانه به سفره آب زیرزمینی و مقادیر مثبت نشان‌دهنده زهکشی از آبخوان به شبکه رودخانه است.

Wei and Baiely, 2019; Abiye et al., 2018 است که عملاً وارد کردن تمام جزئیات مؤثر بر جریان آب زیرزمینی در یک سلول شبکه ۵۰۰ متری در شرایط واقعی به مدل امکان‌پذیر نیست. علاوه بر این، عدم ثبت برداشت از چاه‌ها همراه با چاه‌های غیرمجاز، خطای انسانی در ثبت تراز آب زیرزمینی چاه‌های مشاهداتی در پیزومترها و خطا در تخمین ضرایب هیدرودینامیک مانند هدایت هیدرولیکی می‌تواند باعث تغییرات قبل توجهی در شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی در بازه‌های زمانی شود.

اندرکنش بین آبخوان و رودخانه

شبیه‌سازی بین جریان سطحی رودخانه و تراز سطح آب زیرزمینی در آبخوان منجر به اندرکنش و تعامل بین آبخوان و رودخانه می‌شود. در این مدل علاوه بر رودخانه‌های دائمی دشت (رودخانه مهاباد)، اثر رودخانه‌ها و آبراهه‌های فرعی نیز در فرآیند مدل سازی در نظر گرفته شد. اطلاعات مربوط به رودخانه‌های فرعی

جدول ۱- مقادیر خطای محاسبه توسط مدل در محل پیزومترها

Table 1 - Error values calculated by the model at the location of piezometers

Piezometer Number	UTMx	UTMy	Label	RMSE (m)	
				Calibration	Validation
1	4084121	565370	Arazi_Darlak	0.11	0.14
2	4079903	566408	Arazi_Daryaz	0.23	0.18
3	4081827	570032	Arazi_Gharekhan	0.28	0.29
4	4087701	564805	Arazi_Ghezelgapi	0.30	0.34
5	4090810	561637	Arazi_Kosekahriz	0.16	0.19
6	4089570	571027	Arazi_Gerdgeroy	0.26	0.39
7	4075860	567790	Egirghash	0.82	0.67
8	4084402	566404	Darlak	0.32	0.26
9	4084398	570884	Serah_hajikhosh	0.29	0.19
10	4085629	564340	Serah_ghezalgapi	0.15	0.15
11	4079685	569900	Fakhriaghah	0.28	0.55
12	4082072	569686	Gharekhan	0.28	0.20
13	4092896	562336	Gharegheshlagh	0.45	0.23
14	4088748	564259	Ghezelgapi_Gharegheshlagh	0.32	0.36
15	4079890	568007	Ghomghaleh_Koreh	0.27	0.40
16	4087884	560088	Koseh_Kahriz	0.16	0.11
17	4094738	563231	Kohneh_Deh	0.22	0.17
18	4088419	566322	Gapiss	0.46	0.45
19	4088046	571043	Gabazeleh	0.44	0.53
20	4088716	574129	Gerdgroy	0.53	0.28
21	4081507	571301	Gortapeh	0.44	0.33
22	4084408	568908	Lej	0.31	0.46

نواحی جنوبی و غربی تغذیه می‌گردد (شکل ۵). به طور متوسط میزان کل زهکشی روزانه آب زیرزمینی به رودخانه‌ها برابر با ۸۲۹۰۰ و ۱۰۲۹۰۰ و ۱۱۰۰۰ مترمکعب در روز به ترتیب در سال‌های خشک، نرمال و تر شبهه‌سازی شده است. همچنین، تقدیم آب زیرزمینی در توسط رودخانه‌ها نیز ۱۴۶۵۰، ۲۱۷۵۰ و ۲۶۲۵۰-۲۶۲۵۰ مترمکعب در روز محاسبه شد.

نتایج نشان می‌دهد فعل و انفعالات و اندکنش بین منابع آب سطحی و زیرزمینی عمدهاً منجر به زهکشی آب از آبخوان به رودخانه (تغذیه رودخانه) در نواحی مرکزی و شمالی دشت می‌شود. از آنجاکه عمق آب زیرزمینی در قسمت شمالی و مرکزی دشت (دو الی پنج متر) کمتر از قسمت جنوبی و غربی آن (پنج الی نه متر) است؛ بنابراین در این نواحی رودخانه‌ها به عنوان زهکش عمل کرده و آب زیرزمینی را تخلیه می‌نمایند؛ اما آبخوان توسط رودخانه‌ها در

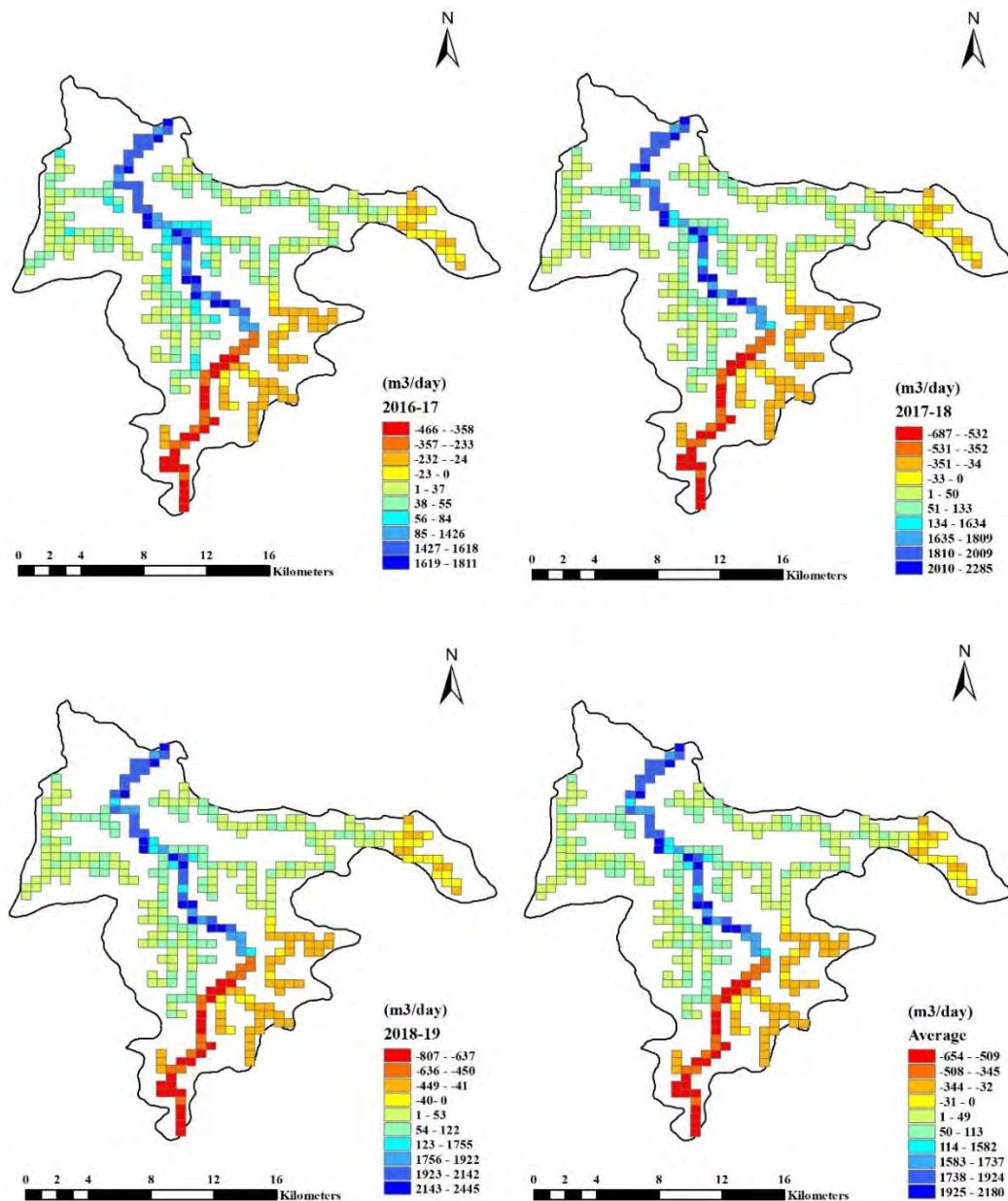


Fig. 5- Recharge and drainage rate between river and aquifer for three water years 2016-17 (dry year), 2017-18 (normal year) and 2018-19 (wet year)

شکل ۵- میزان تغذیه و زهکشی بین رودخانه و آبخوان برای سه سال آبی ۱۳۹۵-۹۶ (سال خشک)، ۱۳۹۶-۹۷ (سال نرمال) و سال ۱۳۹۷-۹۸ (سال تر)

مقایسه با زهکشی بیش از حد آب زیرزمینی توسط رودخانه در نواحی مرکزی و شمالی دشت کم است. زهکشی آب زیرزمینی به سمت شبکه رودخانه به طور مداوم بدون توجه به افزایش بهره‌برداری از آب زیرزمینی افزایش می‌یابد. به طوری که در طول سال آبی خشک (با میزان بارندگی ۱۸۰ میلی‌متر) میزان زهکشی از آب زیرزمینی به شبکه رودخانه (۳۰/۲۵ میلیون مترمکعب) بود. سپس دو سال پس از آنکه بارش در سال آبی تر به اوج خود رسید (۵۰۶ میلی‌متر)، میزان نشت به حدکثر میزان خود (۴۰/۱۵ میلیون مترمکعب) رسیده است. می‌توان خاطر نشان کرد که در شبکه رودخانه محدوده، رودخانه اصلی مهاباد به صورت یک رودخانه دائمی رفتار می‌کند؛ اما رودخانه‌های فرعی (آبراهه‌ها) در طول سال‌ها کم‌ویش به صورت یک رودخانه فصلی عمل می‌کنند. بررسی توزیع الگوی اندرکنش بین آبخوان و رودخانه در گزارش بیلان آبخوان آبرفتی دشت مهاباد نیز با نتایج فوق مطابقت دارد (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014). به طور کلی بررسی‌ها نشان داده است اندرکنش و نشت دوچانه بین آبخوان و رودخانه به عوامل متعددی همچون میزان بارندگی و تغذیه آب زیرزمینی، وضعیت تراز سطح ایستابی، قابلیت انتقال بستر رودخانه، ضربه ذخیره و قابلیت انتقال آبخوان بستگی دارد. به طوری که علاوه بر سطح آب زیرزمینی، بر مناطق برداشت از آب زیرزمینی نیز تأثیر می‌گذارد (Xu and Beekman, 2003; Le Maitre and Colvin, 2008).

اندرکنش بین آبخوان و رودخانه‌ها تقریباً از الگوی بارندگی سالانه و نوسانات جریان رودخانه و انهر طبیعی تبعیت می‌کند. در سه سال آبی مورد بررسی، مجموع میزان تأمین آب آبیاری از منابع آب سطحی تقریباً یکسان است؛ اما میزان بارندگی در سال آبی تر نسبت به سال خشک قبل توجه است. این امر سبب شده است اولاً میزان تغذیه آب زیرزمینی بیشتری در سال تر نسبت به سال خشک اتفاق بیافتد به طوری که این مسئله منجر به بالا آمدن تراز سطح ایستابی ۱/۴۷ متری (بر اساس داده‌های میدانی تراز آب زیرزمینی در سطح پیزومترها) در سال تر نسبت به افت ۱/۱۴ متری تراز آب زیرزمینی در سال خشک شود. از طرف دیگر میزان جریان رهاسازی به رودخانه از بالادست و رواناب تولیدی در سطح دشت در سال تر نسبت به سال خشک افزایش یافته است. درنتیجه افزایش تراز سطح ایستابی و افزایش میزان جریان آب در رودخانه در سال تر نسبت به سال خشک منجر به تقویت شبکه هیدرولیکی بین آبخوان و رودخانه شده است که درنهایت این امر باعث می‌شود اندرکنش بین آبخوان و رودخانه بین سال‌های آبی مختلف متفاوت باشد. بنابراین به نظر می‌رسد الگوی بهره‌برداری در سال‌های آبی مختلف باستی متفاوت اتخاذ گردد؛ زیرا نمی‌توان به طور مداوم ظرفیت برداشت از آبخوان را افزایش داد و افت سطح آب زیرزمینی را انتظار نداشت. مگر این که میزان تغذیه آب زیرزمینی در سال‌های آبی تر بتواند افت ایجاد شده در سال‌های دیگر را جبران کند.

نتایج نشان داد الگوی مکانی و زمانی میزان نشت و زهکشی بین آب‌های زیرزمینی و شبکه رودخانه یکنواخت نبوده و تقریباً الگوی بارندگی سالانه و رهاسازی آب از سد مهاباد به دریاچه را دنبال می‌کند. به طوری که بهوضوح تنوع زمانی اندرکنش بین آبخوان و رودخانه‌ها در یک سال آبی مشخص قابل مشاهده بود. به طور مشخص فارغ از نوع سال آبی، میزان تبدلات بین آبخوان و رودخانه‌ها در فصل پاییز نسبت به سایر فصول سال بسیار بیشتر بود بررسی‌ها نشان داد در این فصل علاوه بر رهاسازی قابل توجه آب در رودخانه مهاباد به سمت دریاچه (حدود ۹۵ درصد از کل رهاسازی)، ۳۵ درصد بارندگی سالیانه نیز در این فصل اتفاق افتاده است. همچنین، شبیه‌سازی‌ها حکایت از تنوع مکانی اندرکنش بین آب‌های زیرزمینی و سطحی در رودخانه‌های واقع در دشت دارد. به طوری که میزان Standard Deviation (SD) برای سه سال خشک، نرمال و تر به ترتیب برابر با ۵۴۷، ۶۸۴ و ۷۳۶ مترمکعب در روز (به طور متوسط برابر با ۶۵۵ مترمکعب در روز) محاسبه شد که نشت و زهکشی بسیار متغیر آب زیرزمینی را بر اساس شرایط مختلف هیدرولوژیکی نشان می‌دهد.

نتایج شبیه‌سازی حکایت از اختلاف قابل توجه نشت دوچانه بین آب‌های زیرزمینی و جریانات سطحی به خصوص بین سلوک‌های واقع بر رودخانه اصلی مهاباد و سلوک‌های واقع بر آبراهه‌های فرعی در هر سه سال آبی دارد (شکل ۵). بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیشتر انشعابات موجود در منطقه مدل‌سازی شده آبخوان، رودخانه‌هایی می‌باشند که زهکشی آب از آبخوان به رودخانه (مقادیر مثبت) انتقال می‌یابند دقیقاً جایی که آب‌های زیرزمینی توسط بستر رودخانه اصلی مهاباد و آبراهه‌های واقع در نواحی مرکزی، شرقی و شمالی دشت زهکشی می‌شوند. قسمت‌های مرکزی و شمالی و بهویژه در نزدیکی خروجی اصلی دشت از نظر توبوگرافی تقریباً مسطح و سطح آب زیرزمینی بالا و نزدیک به سطح زمین است. این امر باعث می‌شود رودخانه‌های واقع در این نواحی بیشتر به عنوان زهکش آبخوان عمل کنند. به طوری که میزان زهکشی آب از آبخوان به رودخانه به ترتیب در سال‌های آبی خشک، نرمال و تر به میزان حدود ۳۷/۵۰، ۳۰/۲۵ و ۴۰/۱۵ میلیون مترمکعب در سال در نواحی مرکزی و شمالی دشت به دست آمد. همچنین، در این نواحی میزان هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه نیز بعد از فرآیند واسنچی بسیار بیشتر از سایر نواحی به دست آمد که بهنوبه خود منجر به زهکشی بیشتر آب زیرزمینی به رودخانه‌ها و شاخه‌های جریان می‌شود؛ اما در نواحی جنوبی و غربی دشت که سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از سایر مناطق است آب زیرزمینی توسط رودخانه تغذیه می‌شود. میزان نشت از رودخانه به آبخوان در این نواحی در سال‌های آبی خشک، نرمال و تر به ترتیب به میزان حدود ۵/۳۵ ۷/۹۵ و ۹/۶۰ میلیون متر مکعب در سال برآورد شده است. با این حال، مقدار کل تغذیه آب زیرزمینی توسط رودخانه مهاباد و آبراهه‌ها در بخش‌های جنوبی و غربی دشت در

به صورت میانگین تبخیر روزانه در طول سه سال آبی خشک، نرمال و تر در شکل (۶) نشان داده شده است. میزان میانگین سالانه تبخیر از آب زیرزمینی که توسط مدل MODFLOW-NWT شبیه‌سازی شده برای سال‌های ۱۳۹۵-۹۶، ۱۳۹۶-۹۷، ۱۳۹۷-۹۸ و ۱۳۹۸-۹۹ به ترتیب برابر با ۰.۴۸، ۰.۵۱، ۰.۵۷ و ۰.۵۲ میلی‌متر در سال برآورد شده است.

نوسانات تبخیر از سطح آب زیرزمینی

عمق سطح آب زیرزمینی عامل اصلی تبخیر از آب زیرزمینی است و هر چه سطح آب زیرزمینی به سطح زمین نزدیک‌تر باشد، تبخیر از آن بیشتر است. در این مطالعه از بسته ETS در مدل MODFLOW-NWT برآورد تبخیر از سطح آب زیرزمینی استفاده شد. الگوی توزیع مکانی میزان تبخیر از آب زیرزمینی

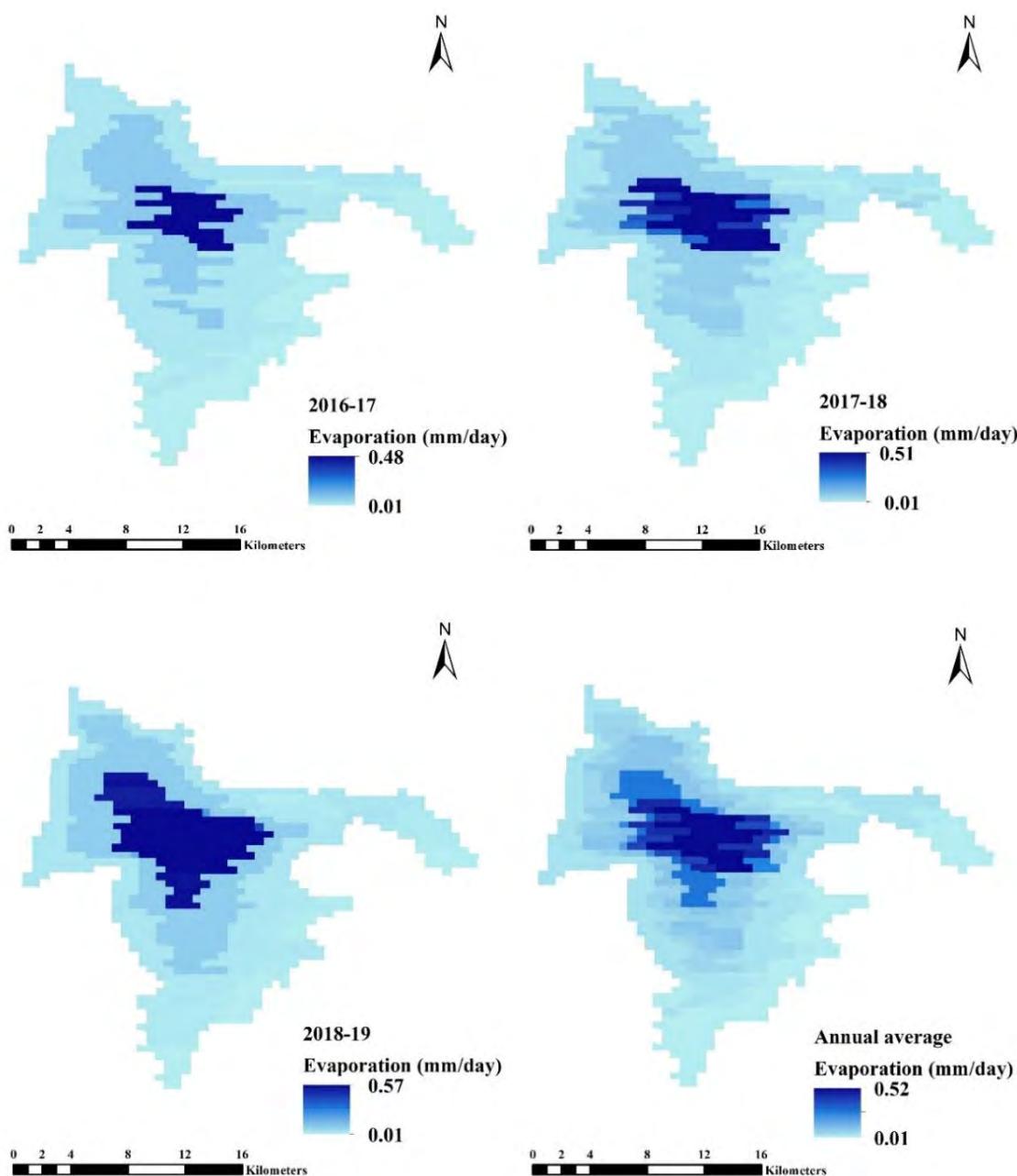


Fig. 6- Evaporation rate from groundwater for the three hydrological years 2016-17 (dry year), 2017-18 (normal year) and, 2018-19 (wet year)

شکل ۶- میزان تبخیر از سطح آب زیرزمینی برای سه سال آبی ۱۳۹۵-۹۶ (سال خشک)، ۱۳۹۶-۹۷ (سال نرمال) و سال ۹۸-۹۹ (سال تر)

بارندگی‌های بهاره، الگوی رهاسازی آب از سد به سمت دریاچه (در ماههای اسفند تا اردیبهشت) و نیز نفوذ عمقی ناشی از آب آبیاری افزایش می‌یابد. این عوامل سبب شده است میزان تبخیر از سطح آب زیرزمینی در این فصل بیشتر از سایر فصل‌های سال باشد. لازم به ذکر است نتایج مدل بر اساس مقدار تبخیر از آب زیرزمینی تخمین زده شده توسط شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی بررسی شد. نتایج نشان داد مقادیر تبخیر از آب زیرزمینی برآورد شده توسط مدل منطقی و قابل قبول است. الگوهای زمانی و مکانی ذکر شده در هر سه سال آبی خشک، نرمال و تر مشاهده می‌شود. نتایج سایر محققین نیز نشان داده است در آبخوان‌های کم‌عمق، میزان تبخیر از سطح آب زیرزمینی نه تنها به الگوی عمق آب زیرزمینی در طول سال و در مناطق مختلف بستگی دارد بلکه میزان آن در فصول آبیاری افزایش می‌یابد (Wei and Baiely, 2019).

نتیجه‌گیری

محدودیت‌های موجود در تأمین آب موردنیاز از منابع آب سطحی، منجر به توسعه راهبردهای مدیریتی توانمند بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی شده است. در این راستا بررسی تبادل‌های منابع آب سطحی و زیرزمینی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف و اثربخشی الگوهای متفاوت بهره‌برداری از منابع تلفیقی در مدیریت پایدار منابع سطحی و زیرزمینی اهمیت دارد. یکی از مزیت‌های مهم مدل تلفیقی-SWAT-MODFLOW-NWT امکان بررسی مؤلفه‌های بیلان از جمله تبادل‌های بین رودخانه‌ها و آب زیرزمینی تحت تأثیر شبیه‌سازی است. در این مطالعه بررسی خطای مدل در گام زمانی شبیه‌سازی (ماهانه) نشان داد میزان خطا در شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در برخی ماهها مانند مهر، فروردین، اردیبهشت، خرداد و شهریور افزایش یافته است. دلیل این امر را می‌توان به افزایش ناگهانی سطح آب در برخی از پیزومترهای واقع در حاشیه رودخانه مهاباد در اثر ورود سیلاب بالادست و درنتیجه رهاسازی موضعی حجم قابل توجه آب در رودخانه نسبت داد. به طوری که این امر منجر به نوسانات تراز آب زیرزمینی در این پیزومترها در اثر نشت آب از رودخانه به آبخوان می‌شود. همچنین، افزایش برداشت از آب زیرزمینی و بالطبع افت موضعی سطح آب زیرزمینی در برخی پیزومترهای دیگر انفاق افتد. است که توسط آن‌ها رصد شده است. بنابراین، رهاسازی حجم قابل توجه آب در یک بازه زمانی کوتاه در رودخانه و یا افزایش برداشت به صورت موضعی در یک ناحیه مشخص منجر به تغییرات ناگهانی سطح آب زیرزمینی در برخی مناطق مدل‌سازی می‌شود. این مسئله باعث می‌شود خطای شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در پیزومترهای واقع در این مناطق نسبت به نواحی دیگر افزایش یابد. نوسانات شدید سطح آب زیرزمینی بر اساس هیدروگراف‌های این پیزومترها مؤید این مسئله بود. علاوه‌براین، با توجه به تناوب قراتب پیزومترها،

اعداد داخل پرانتز به میلیون مترمکعب است. به طور متوسط در دوره معینی از سه سال آبی موردنظر میزان تبخیر روزانه از آب زیرزمینی از ۰/۱۰ تا ۰/۵۱ میلی‌متر در روز متغیر است.

بررسی الگوی توزیع تبخیر از سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد گستره تبخیر از آب زیرزمینی در نواحی مرکزی و شمالی دشت و امتداد رودخانه اصلی مهاباد متمرکز است. به طوری که پهنه و میزان آن در سال تر نسبت به سال نرمال و نیز سال نرمال نسبت به سال خشک بیشتر است. هرچقدر از نواحی مرکزی دشت به سمت غرب و جنوب دشت پیش می‌رویم میزان تبخیر از سطح آب زیرزمینی کاسته می‌شود. این الگو تا حدود زیادی با وضعیت ترازو و عمق سطح آب زیرزمینی نیز مطابقت دارد. به طوری که از ۲۵۳ کیلومترمربع ناحیه مدل‌سازی، وسعت نواحی تبخیر از آب زیرزمینی حدود ۱۲۲ کیلومترمربع است که حدود ۳۰ و ۹۲ کیلومترمربع آن به ترتیب دارای عمق آب زیرزمینی بین یک تا دو متر و دو تا سه متر عمدتاً واقع در نواحی مرکزی و شمالی دشت بوده و مابقی آبخوان دارای عمق سطح آب زیرزمینی بیش از سه متر عمدتاً در نواحی غربی و جنوبی دشت است. بررسی‌ها نشان داد زیاد بودن میزان تبخیر از سطح آب زیرزمینی در مناطق مرکزی و شمالی نسبت به مناطق غربی و جنوبی بالا بودن سطح آب زیرزمینی در این مناطق نسبت به سایر مناطق دشت ارتباط زیادی دارد. همچنین، در بخش‌هایی از آبخوان به خصوص جنوب و جنوب غربی آبخوان به دلیل استفاده پیش‌از‌حد از آب زیرزمینی، عمق آب نسبت به سایر مناطق دشت پایین افتاده است. درنتیجه تبخیر از سطح آب زیرزمینی نیز کاهش می‌یابد. تبخیر از آب زیرزمینی به عنوان تلفات غیرمولد یا غیرمفید محسوب می‌شود و منبع آب با پتانسیل مناسب برای مصرف محسوب می‌شود. لذا امکان‌سنجی کاهش این نوع از تلفات از طریق برداشت بیشتر از آب زیرزمینی در مناطق با پتانسیل تبخیر بالا برای تأمین مصارف کشاورزی قابل بررسی است. در این راستا میزان رهاسازی به دریاچه در جهت تأمین حقایق آن تقویت می‌شود. با توجه به الگوی آبیاری در منطقه، می‌توان فصل‌های بهار و تابستان را فصل آبیاری تلقی کرد. بررسی الگوی زمانی تبخیر از سطح آب زیرزمینی نیز نشان داد مقدار متوسط تبخیر از آب زیرزمینی در طول دوره شبیه‌سازی تقریباً ثابت بوده و این میزان در فصل آبیاری نسبت به فصل غیر آبیاری بیشتر است. به طوری که در اکثر مناطق میزان تبخیر از سطح آب زیرزمینی در فصل زمستان به حداقل مقدار خود (صفر) و در فصل بهار به حداکثر مقدار خود (پیش از یک میلی‌متر در روز) رسیده و سپس در فصل‌های تابستان و پاییز کاهش می‌یابد. گرچه در فصل زمستان سطح آب زیرزمینی با توجه به عدم برداشت از آب زیرزمینی بالا می‌آید؛ اما با توجه به این که پتانسیل تبخیر در این فصل بسیار پایین است، لذا میزان تبخیر از سطح آب زیرزمینی نیز حداقل خواهد بود. البته بررسی نوسانات فصلی ترازو و عمق آب زیرزمینی آبخوان بر اساس هیدروگراف واحد آبخوان و ترازو آب ماهانه اندازه‌گیری شده در چاههای مشاهده‌ای نشان می‌دهد سطح آب زیرزمینی در فصل بهار به دلیل

نسبت به سال خشک بیشتر است. بررسی‌ها نشان داد این الگو با سطح آب زیرزمینی بالا در این نواحی ارتباط نزدیکی دارد. به طور کلی حوضه آبریز دریاچه ارومیه به شدت تحت تأثیر پهنه‌برداری غیرمتعارف از منابع آب قرار گرفته و مدل‌های جامع برای ارزیابی و مدیریت همه‌جانبه و یکپارچه منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌تواند برای حداکثر سازی تأمین حقابه دریاچه ارومیه با توجه به الگوی تأمین نیاز آبیاری اراضی کشاورزی از منابع تلفیقی مورد استفاده قرار گیرد. این امر مستلزم این است که اندرکش منابع آب سطحی و زیرزمینی در پهنه‌های مختلف دشت و آبخوان مناسب با تفاوت‌های سهم تأمین آب کشاورزی از منابع آب تلفیقی به خوبی قابل شیوه‌سازی و پیش‌بینی باشد. بررسی نشان داد امکان مدیریت و ظرفیت برداشت بیشتر از آبخوان تحت الگوهای مختلف در مناطق مرکزی و شمالی آبخوان البته در خارج از دامنه حریم رودخانه به دلیل سطح آب زیرزمینی بالا ($1/5$ تا سه متر) وجود دارد. درواقع این امر منجر به کاهش سهم تبخر بعنوان مصرف غیرمفید می‌شود. همچنین، با نگهداری سطح آب زیرزمینی در عمق معین (در شرایط پایدار)، کیفیت خاک بهبود یافته و درنتیجه عملیات کشت و کار ماشین آلات بهتر صورت می‌گیرد؛ اما محدودیت برداشت بیشتر از آبخوان در مناطق حریم رودخانه با توجه به امکان ایجاد شبیه هیدرولیکی معکوس بین منابع آب سطحی و زیرزمینی و درنتیجه اثر منفی نشت از رودخانه به آبخوان وجود دارد. درواقع اتخاذ الگوی پهنه‌برداری مناسب از منابع آب تلفیقی در سال‌های آبی مختلف در پهنه آبخوان باید به گونه‌ای باشد که علاوه بر تضمین پایداری آب زیرزمینی در دراز مدت، جریان آب سطحی خروجی از دشت و ورودی به دریاچه را تقویت کند.

تشکر و قدردانی

مؤلفین از مدیریت و کارشناسان ستاد احیای دریاچه ارومیه که
امکان دسترسی به اطلاعات موردنیاز تنظیم این مقاله را فراهم
آورند مراتب قدردانی و سپس خود را اعلام می‌دارند.

اماکن برآورد دقیق تغییرات آب ورودی و خروجی و پایش نوسانات سطح آب زیرزمینی در مناطق مرزی وجود ندارد. به همین دلیل میزان خطا در پیزومترهای نزدیک به مرزهای ورودی و خروجی آبخوان نیز افزایش یافته است.

مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW-NWT به خوبی قادر بود اندکشین بین آبخوان و رودخانه در سال های آبی متفاوت را شبیه سازی کند. در این مطالعه، رودخانه های فرعی متصل به رودخانه اصلی مهاباد که عمدتاً به صورت فصلی جریان دارند در مدل سازی در نظر گرفته شدند. در نظر گرفتن رودخانه های فرعی در فرآیند مدل سازی منجر به اعمال تأثیر این آبراهه ها در نواحی مختلف دشت بر نوسانات سطح آب زیرزمینی می شود. نتایج نشان داد اندکشین بین آبخوان و رودخانه قابل توجه بوده و در سال های آبی مختلف متفاوت است. به طوری که قلل و افعالات و اندکشین بین منابع آب سطحی و زیرزمینی عمدتاً منجر به زهکشی آب از آبخوان به رودخانه به ترتیب در سال های آبی خشک، نرمال و تر به میزان حدود $30/25$ و $37/50$ و $40/15$ میلیون مترمکعب در سال در نواحی مرکزی و شمالی دشت می شود. قسمت های مرکزی و شمالی و خروجی اصلی دشت از نظر توپوگرافی تقریباً مسطح و سطح آب زیرزمینی در این مناطق بالا است. این امر باعث می شود رودخانه های واقع در این نواحی بیشتر به عنوان زهکش آبخوان عمل کنند؛ اما در نواحی جنوبی و غربی دشت که سطح آب زیرزمینی پایین تر از سایر مناطق است آب زیرزمینی توسط رودخانه تغذیه می شود. به طوری که میزان تغذیه آبخوان توسط رودخانه در این نواحی در سال های آبی خشک، نرمال و تر به ترتیب به میزان حدود $9/60$ و $7/95$ و $5/35$ میلیون متر مکعب در سال به دست آمد. همچنین بررسی الگوی توزیع تبخیر از سطح آب زیرزمینی نشان می دهد بیش ترین تبخیر از آب زیرزمینی از نواحی مرکزی و شمالی دشت و امتداد رودخانه اصلی مهاباد صورت می گیرد. به طوری که پنهانه و میزان آن در سال تر نسبت به سال نرمال و نیز سال نرمال

References

- References**

 - 1- Abiye, T., Masindi, K., Mengistu, H. and Demlie, M., 2018. Understanding the groundwater level fluctuations for better management of groundwater resource: A case in the Johannesburg region. *Groundw. Sustainable Development*, 7, pp. 1-7.
 - 2- Aliyari, F., Bailey, R.T., Tasdighi, A., Dozier, A., Arabi, M. and Zeiler, K., 2019. Coupled SWAT-MODFLOW model for large-scale mixed agro-urban river basins. *Environmental Modelling and Software*, 115, pp. 200-210.
 - 3- Bailey R.T., Wible T.C., Arabi M., Records R.M. and Ditty, J., 2016. Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater-surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. *Hydrological Processes*, 30, pp. 4420-4433.
 - 4- Bedekar, V., Niswonger, R.G., Kipp, K., Panday, S. and Tonkin, M., 2012. Approaches to the simulation of unconfined flow and perched groundwater flow in MODFLOW. *Groundwater*, 50(2), pp.187-198.

- 5- Bejranonda, W., Koontanakulvong, S. and Koch, M., 2007. Surface and groundwater dynamic interactions in the Upper Great Chao Phraya plain of Thailand: Semi-Coupling of SWAT and MODFLOW; *Groundwater and Ecosystems*, IAH Selected Papers on Hydrogeology; *International Association of Hydrology*: Goring, UK, pp. 17-21.
- 6- Chitsazan, M. and Kashkuli, H.A., 2002. Groundwater Modeling and Solving Hydrogeological Problems. Translation, *Shahid Chamran University Press*, Ahvaz. (In Persian).
- 7- Chitsazan, M. Nozarpourvar, L., Nedri, A. and Farhadimanesh, M., 2016. Evaluation of hydraulic relationship between Lore Andimeshk plain aquifer and Dez river using MODFLOW model, *Journal of Advanced Applied Geology*, 17, pp. 23-36. (In Persian).
- 8- Chu, J., Zhang, C. and Zhou, H., 2010. Study on interface and frame structure of SWAT and MODFLOW models coupling. *Geophysical Research Abstracts*, V12, EGU2010-4559.
- 9- Chunn, D., Faramarzi, M., Smerdon, B. and Alessi, D.S., 2019. Application of an integrated SWAT-MODFLOW model to evaluate potential impacts of climate change and water withdrawals on groundwater-surface water interactions in west-central Alberta. *Water*, 11(1), pp. 110.
- 10- Davis, S.N. and De Wiest, R.J.M., 1996. *Hydrogeology*. New York, Wiley.
- 11- Doherty, J., 2003. Ground water model calibration using Pilot points and Regularization. *Groundwater*, 41(2), pp. 170-177.
- 12- Doherty, J., Brebbra, L. and Whyte, P., 1994. *PEST: Model-independent parameter estimation*. Watermark Computing, Corinda, Australia, 122, pp.336.
- 13- Dowlatabadi, S. and Zomorodian, S.A., 2016. Conjunctive simulation of surface water and groundwater using SWAT and MODFLOW in Firoozabad watershed. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(1), pp.485-496.
- 14- Hamzehkhani, H., 2015. Groundwater modeling to investigate the effectiveness of aquifer on surface flows by applying different exploitation policies using remote sensing technology (case study: Miandoab plain), *M.Sc. Thesis, Sharif University of Technology*, Iran. pp. 175. (In Persian).
- 15- Harbaugh, A.W., 2005. *MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process* (Vol. 6). Reston, VA, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey.
- 16- Heydari, J., Chitsazan, M. and Mirzaei, S.Y., 2019. Modeling the Hydrogeological Relationship of Sahneh-Bistoon Plain Aquifer with Gamasiab River and Aquifer Management. *Hydrogeology*, 4(1), pp. 140-152.
- 17- Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Ghahraman, B., Sadeghi, M. and Moghaddamnia, A., 2012. Application of "panel-data" modeling to predict groundwater levels in the Neishaboor plain, Iran. *Hydrogeology Journal*, 20 (3), pp. 435-447.
- 18- Kardan Moghaddam, H., Banihabib M.E. and Javadi, S., 2018. Quantitative sustainability analysis of the aquifer system (case study: south Khorasan-Birjand aquifer). *Journal of Water and Soil*, 31(6), pp. 1587-1601.
- 19- Kim, N.W., Chung, I.M., Won, Y.S. and Arnold, J.G., 2008. Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. *Journal of Hydrology*, 356(1-2), pp. 1-16.
- 20- Kouchakzadeh, M.H. and Nasiri, F., 2015. Evaluation of the efficiency of using surface water simulation results to improve the accuracy of groundwater simulation in Silakhor shallow aquifer located in Lorestan province (Iran), *Modares Civil Engineering Journal*, 14(3), pp. 129-138. (In Persian).

- 21- Le Maitre, D.C. and Colvin, C.A., 2008. Assessment of the contribution of groundwater discharges to rivers using monthly flow statistics and flow seasonality. *Water SA*, 34 (5), 549-564.
- 22- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. Techniques of Water Resources Investigations, Book 6. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.
- 23- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 2003. The history of MODFLOW. *Ground water*, 41(2), 280.
- 24- Mojtabaei, A., Almasi, R. and Dadashzadeh, M., 2018. The evaluation of the impact of the anthropogenic factors on Lake Urmia crisis using remote sensing and GIS, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(2), pp. 59-70. (In Persian).
- 25- Molina-Navarro, E., Bailey, R.T., Andersen, H.E., Thodsen, H., Nielsen, A., Park, S., Jensen, J.S., Jensen, J.B. and Trolle, D., 2019. Comparison of abstraction scenarios simulated by SWAT and SWAT-MODFLOW. *Hydrological sciences journal*, 64(4), pp.434-454.
- 26- Moor, C. and Doherty, J., 2006. The cost of uniqueness in groundwater model calibration. *Advances in Water Resources*, 29, pp. 605-623.
- 27- Mosase, E., Ahiablame, L., Park, S. and Bailey, R., 2019. Modelling potential groundwater recharge in the Limpopo River Basin with SWAT-MODFLOW. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100260.
- 28- Movahedian, A. and Chitsazan, M., 2016. Analysis of interactions of groundwater and Karun river in Gotvand-Aghili plain using MODFLOW model. *Watershed Management Research*, 111, pp.9-18. (In Persian)
- 29- Nassery, A. 2019. Comparison of fourteen methods of time series to analyze and predict ground water changes in Marand plain (North of Urmia Lake), *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(1), pp. 58-68. (In Persian)
- 30- Nayyeri, H., 2015. Morphological analysis of Mahabad river channeled the impact of Dam construction, *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 15(37), pp. 155-178. (In Persian).
- 31- Niswonger, R.G., Panday, S. and Ibaraki, M., 2011. MODFLOW-NWT, A Newton formulation for MODFLOW-2005: *USGS Survey Techniques and Methods* 6-A37.
- 32- Nozarpour, L., Chitsazan, M., Nadri, A. and Farhadimanesh, M., 2015. Evaluation of the Lour-Andimeshk aquifer and the Dez-River interaction: using MODFLOW. *Advanced Applied Geology*, 5(3), pp. 23-36. (In Persian)
- 33- Palma, H.C. and Bentley, L.R., 2007. A regional-scale groundwater flow model for the Leon-Chinandega aquifer, Nicaragua. *Hydrogeology Journal*, 15, pp. 1457-1472.
- 34- Park, S. and Bailey, R.T., 2017. SWAT-MODFLOW tutorials: documentation for preparing model simulations; department of civil and environmental engineering, *Colorado State University: Fort Collins*, CO, USA; 56p.
- 35- Raja, O., Parsinejad, M. and Tajrishi, M., 2021. Multipurpose calibration of SWAT model in estimating runoff, evapotranspiration, and crop yield (A case study: Mahabad plain), *Iran-Water Resources Research*, 17 (4), 11-34. (In Persian).
- 36- Raja, O., Parsinejad, M., and Tajrishi, M., 2022. Simulation of Groundwater Balance Using Integrated Surface and Groundwater SWAT-MODFLOW-NWT Model (Case Study: Mahabad Plain), *Journal of Water and Soil*, 36 (1), pp. 32-52. (In Persian).

- 37- Saadatpour, A., Alizadeh, A., Ziae, A.N. and Izady, A., 2019. Integrated surface and groundwater flow modeling in Neishaboor watershed with SWAT-MODFLOW, *Journal of Water and Soil*, 33(4), pp. 521-536. (In Persian)
- 38- Saberimehr, S., Asghari Moghaddam, A. and Nadiri, A., 2017. Modeling groundwater flow and salinity intrusion at Shabestar plain aquifer using GMS software model, *Quaternary Journal of Iran*, 3(9), 41-50. (In Persian).
- 39- Sarvari, S., Ziae, A.N. and Joodavi, A., 2019. Investigation of river-aquifer interactions in Bojnourd plain using reach measurements and numerical modeling. *Journal of Water and Soil*, 33(5), 671-683. (In persian)
- 40- Scanlon, B.R., Keese, K.E., Flint, A.L., Flint, L.E., Gaye, C.B., Edmunds, W.M. and Simmers, I., 2006. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *An International Journal*, 20(15), pp. 3335-3370.
- 41- Semiroomi, M.T. and Koch, M., 2019. Analysis of spatio-temporal variability of surface-groundwater interactions in the Gharehsoo river basin, Iran, using a coupled SWAT-MODFLOW model. *Environmental Earth Sciences*, 78(6), pp. 201.
- 42- Sophocleous, M. and Perkins, S.P., 2000. Methodology and application of combined watershed and ground water models in Kansas. *Journal of Hydrology*, 236(3-4), pp. 185-201.
- 43- Sophocleous, M.A., 2005. Groundwater recharge and sustainability in the high plains aquifer in Kansas, USA. *Hydrogeology Journal*, 13(2), pp. 351-365
- 44- Sun, H., and Cornish, P.S., 2005. Estimating shallow groundwater recharge in the headwaters of the Liverpool plains using SWAT. *Hydrological Processes*, 19(3), pp. 795-807.
- 45- Valizadegan, E. and Yazdanpanah, S., 2018. Quantitative model of optimal conjunctive use of Mahabad plain's surface and underground water resources, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(4), pp. 631-640. (In Persian).
- 46- Water Consulting Engineers and Sustainable Development., 2014. Update studies of water resources balance of study areas of Urmia Lake catchment area, *report of water resources balance of Mahabad study area*, pp. 81. (In Persian).
- 47- Wei, X. and Bailey, R.T., 2019. Assessment of system responses in intensively irrigated stream-aquifer systems using SWAT-MODFLOW. *Water*, 11(8), pp. 1576.
- 48- Wei, X., Bailey, R.T., Records, R.M., Wible T.C. and Arabi M., 2018. Comprehensive simulation of nitrate transport in coupled surface-subsurface hydrologic systems using the linked SWAT-MODFLOW-RT3D model, *Environmental Modelling and Software*, 122, pp. 1-10.
- 49- Wheater, H.S., 2010. Hydrological processes, groundwater recharge and surface-water/groundwater interactions in arid and semi-arid areas. *Groundwater Modeling in Arid and Semi-Arid Areas*, 1st ed. Howard S. Wheater, Simon A. Mathias and Xin Li. Published by Cambridge University Press, pp. 5-37.
- 50- Xu, Y. and Beekman, H.E., 2003. Groundwater recharge estimation in southern Africa. *UNESCO IHP UNESCO Paris*, 92-9220-000-3.